

การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยสารซัลเฟอร์โดยเทคนิคซีเอ็มเจแมกนีตรอนสปีดเตอริง



นางสาวอรุณญา แซ่เฮ้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF SULPHUR DOPED DIAMOND LIKE CARBON FILMS USING DC MAGNETRON  
SPUTTERING METHOD

Miss Arunya Saeheng



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยสารซัลเฟอร์  
โดยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริง

โดย

นางสาวอรัญญา แซ่เฮ้ง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนิริญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ แดงดีบ)

อรัญญา แซ่เฮ้ง : การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยซัลเฟอร์  
 โดยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง : (SYNTHESIS OF SULPHUR DOPED  
 DIAMOND LIKE CARBON FILMS USING DC MAGNETRON SPUTTERING  
 METHOD) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.ณัฐพร โทณานนท์, อ.ที่ปรึกษา  
 วิทยานิพนธ์ร่วม ผศ. ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง, 80 หน้า.

การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรของเป้าผสมซัลเฟอร์กับแกรไฟต์ ทำโดยการ  
 ตกสะสมโดยดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริงที่ความดัน $8 \times 10^{-2}$  ทอร์ ในระบบบรรยากาศแก๊สอาร์กอน  
 ที่อัตราการไหล 2 sccm ทำให้เกิดฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยซัลเฟอร์ เป้าผสมซัลเฟอร์  
 กับแกรไฟต์ทำจากการผสมผงซัลเฟอร์กับแกรไฟต์ที่จำนวนร้อยละของโมลาร์ซัลเฟอร์แตกต่าง  
 กัน เช่น 0%, 2%, 5%, 8% และ 10% ฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยซัลเฟอร์ถูกปลูกลงบน  
 แผ่นรองรับซิลิกอนและควอตซ์ ที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เวลา และจำนวนร้อยละของโม  
 ลาร์ของซัลเฟอร์ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง ทางกายภาพ และทางโครงสร้างของฟิล์มได้  
 ถูกศึกษา ฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยซัลเฟอร์ในงานนี้ มีค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม  
 คาร์บอนคล้ายเพชรและฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรอยู่ในช่วง  $2.82 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $1.84 \times 10^{-3}$   
 $(\Omega \text{ cm})^{-1}$  และค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยซัลเฟอร์อยู่ในช่วง  
 $5.95 \times 10^{-1} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $6.39 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  สอดคล้องกับค่าแถบพลังงานของฟิล์มคาร์บอน  
 คล้ายเพชรและฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเจือด้วยซัลเฟอร์ในช่วง 1.066-1.967 และ 1.08-2.38  
 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มพบอนุภาคระดับไมครอนกระจายบน  
 พื้นผิว เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยรามานสเปกโทรสโกปีที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอน  
 ต่อซัลเฟอร์ 0-10% ปรากฏสเปกตรัมรามานที่ปรากฏพีก D และพีก G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  
 $1413$  และ  $1573 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ 2-10% พบว่าตำแหน่งพีก G  
 เลื่อนลงจากเลขคลื่น  $1573$  ไปที่เลขคลื่น  $1477 \text{ cm}^{-1}$  และอัตราส่วน  $I_D/I_G$  เพิ่มขึ้นจาก 0.43 ไป  
 0.52 แสดงถึงความเป็นเพชรเพิ่มมากขึ้น

ภาควิชา...วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....อรัญญา แซ่เฮ้ง.....  
 สาขาวิชา...วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....ดร.โทณานนท์.....  
 ปีการศึกษา.....2553.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากหลายๆ ฝ่าย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. ณัฐพร โทณานนท์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในทุกสิ่ง ตลอดจนเป็นกำลังใจให้ผู้เขียน จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณกรรมการทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่าในการตรวจสอบและให้คำแนะนำต่างๆ ในการตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาด เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนในการสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ทุนในการสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย ผศ.กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ และอาจารย์ ดร. รุจิกร ธนวิทยาพล ภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือในการวิเคราะห์ และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณคุณดุสิต งามรุ่งโรจน์ คุณกัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล ที่ให้ความช่วยเหลืองานด้านต่างๆ พร้อมกำลังใจที่ดีมาตลอด

ขอขอบคุณความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือในการวิเคราะห์ ห้องเครื่องมือกลาง ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ขอขอบคุณความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือในการวิเคราะห์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บิดา มารดา น้องสาว และเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนให้มีความร่วมมือในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

# สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                 | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                              | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                 | ฉ  |
| สารบัญ.....  | ช  |
| สารบัญตาราง.....                                     | ฎ  |
| สารบัญภาพ.....                                       | ฏ  |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                    | 1  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....              | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                     | 2  |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                           | 2  |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                   | 3  |
| 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....                          | 3  |
| 1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย.....             | 3  |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                      | 5  |
| 2.1 รูปแบบของคาร์บอนในโครงผลึก .....                 | 5  |
| 2.1.1 เพชร.....                                      | 5  |
| 2.1.2 แกร์ไฟต์.....                                  | 6  |
| 2.1.3 สมบัติของแกร์ไฟต์และเพชร.....                  | 7  |
| 2.2 พิล์ม DLC .....                                  | 7  |
| 2.2.1 โครงสร้างของฟิล์ม DLC.....                     | 7  |
| 2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC.....              | 8  |
| 2.3 การสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคสเปตเตอริง..... | 8  |
| 2.3.1 ผลของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....               | 9  |
| 2.3.1.1 เวลา.....                                    | 9  |
| 2.3.1.2 เปอร์เซนต์สารเจือ.....                       | 10 |
| 2.3.1.3 กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ของผิวเป้า.....          | 10 |
| 2.3.1.4 ระยะห่าง.....                                | 10 |
| 2.3.1.5 ความดัน.....                                 | 10 |
| 2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสเปตเตอริง.....      | 10 |

|  |    |
|--|----|
| 2.4 การใส่อะตอมสารเจือในฟิล์ม DLC.....   | 13 |
| 2.4.1 การใส่อะตอมสารเจือแบบพี.....   | 13 |
| 2.4.1.1 การสังเคราะห์ ฟิล์มDLC โดยใส่อะตอมสารเจือโบรอน.....  | 13 |
| 2.4.2 การโด๊ปแบบเอ็น.....  | 15 |
| 2.4.2.1 การสังเคราะห์ ฟิล์มDLCโดยใส่อะตอมสารเจือไนโตรเจน.....  | 15 |
| 2.4.2.2 การสังเคราะห์ ฟิล์มDLC โดยใส่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส.....   | 18 |
| 2.4.2.3 การสังเคราะห์ ฟิล์ม DLCโดยใส่อะตอมสารเจือซัลเฟอร์.....   | 21 |
| 2.5 รามานสเปกโทรสโกปี.....   | 27 |
| 2.5.1 บทนำ.....  | 27 |
| 2.5.2 ทฤษฎีและหลักการ.....   | 27 |
| 2.5.3 รามานสเปกโทรสโกปี ของฟิล์ม DLC.....  | 27 |
| 2.6 ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....   | 29 |
| 2.6.1 บทนำ.....  | 29 |
| 2.6.2 ทฤษฎีและหลักการ.....   | 30 |
| 2.6.3 การหาค่า Band gap.....   | 30 |
| 2.7 วัดค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้า<br>และวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม..... | 31 |
| 2.7.1 บทนำ.....  | 31 |
| 2.7.2 ทฤษฎีและหลักการวัดฟิล์มด้วยเทคนิค two-probe.....   | 32 |
| 2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....   | 33 |
| 2.8.1 บทนำ.....  | 33 |
| 2.8.2 ทฤษฎีและหลักการ.....   | 33 |
| 2.9 สเปกโทรสโคปีกัลลิเลียมโพสิทีฟ.....   | 34 |
| 2.9.1 บทนำ.....  | 34 |
| 2.9.2 ทฤษฎีและหลักการวัดฟิล์ม.....   | 34 |
| 2.9.3 การพิตโมเดล.....   | 35 |
| บทที่ 3 การทดลอง.....  | 37 |
| 3.1 ระบบดีซีแมกนีตรอนสเปกโตรสโกปี.....   | 37 |
| 3.2 การเตรียมเป่าในการสังเคราะห์.....  | 38 |



|  |    |
|--|----|
| 3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มDLC.....   | 39 |
| 3.3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอน<br>สปัตเตอริง.....   | 39 |
| 3.3.2 ภาวะที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอน<br>สปัตเตอริง.....   | 39 |
| 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์.....   | 40 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....  | 43 |
| 4.1 สมบัติทางไฟฟ้า.....  | 43 |
| 4.1.1 ผลของอัตราส่วนของคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ที่ใช้เป็นเป้าต่อ<br>ลักษณะสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC.....                         | 43 |
| 4.1.2 สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า.....   | 43 |
| 4.2 สมบัติทางแสง.....  | 45 |
| 4.2.1 ดัชนีหักเหของการสะท้อนแสง (Refractive Index)<br>และการดูดกลืนแสง (Extinction Coefficient).....                     | 45 |
| 4.2.2 แถบพลังงานของฟิล์มDLC เจือด้วยซัลเฟอร์ 0-10%.....  | 46 |
| 4.3 สมบัติทางกายภาพ.....   | 50 |
| 4.3.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%...50  |    |
| 4.3.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า .....51   |    |
| 4.3.3 ความหนาของฟิล์ม DLCที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%<br>โดย SEM.. .....   | 52 |
| 4.3.4 ศึกษาปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนซัลเฟอร์0-10%<br>ในเป้าโดย EDX.....                              | 53 |
| 4.3.5 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 2%<br>ต่ออัตราการสังเคราะห์ฟิล์มที่เวลา 30-75 นาที .....        | 55 |
| 4.3.6 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%<br>และเวลา 30-75 นาที โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี ..... | 55 |
| 4.4 สมบัติทางโครงสร้าง.....  | 57 |
| 4.4.1 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีค G ต่อฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วน<br>คาร์บอนต่อซัลเฟอร์0-0.041% ในฟิล์ม.....           | 57 |

|   |    |
|---|----|
| 4.4.2 อัตราส่วน $I_p/I_c$ และตำแหน่งพีค G ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า.....   | 60 |
| 4.4.3 อัตราส่วน $I_p/I_c$ และตำแหน่งพีค G ต่ออัตราการสังเคราะห์ฟิล์ม.....   | 61 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....   | 63 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....   | 63 |
| 5.1.1 การศึกษาผลของฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ 0-10% .....   | 63 |
| 5.1.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า.....   | 63 |
| 5.1.3 การศึกษาผลของอัตราการสังเคราะห์ฟิล์ม.....   | 64 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....   | 64 |
| รายการอ้างอิง.....  | 65 |
| ภาคผนวก.....  | 69 |
| ภาคผนวก ก สมบัติทางไฟฟ้าที่อัตราส่วนซัลเฟอร์ 0-10%.....   | 70 |
| ภาคผนวก ข กราฟที่ได้จากการ Fit โมเดล Tauc- Lorence เงื่อนไข<br>ความต่างศักย์ 500V ที่อัตราส่วนซัลเฟอร์ 0-10%.....             | 71 |
| ภาคผนวก ค วิเคราะห์กราฟที่ได้จากการคำนวณหาค่าแถบพลังงาน<br>จากสเปกโตรสโคปอัลตราไวโอเล็ต.....                                  | 74 |
| ภาคผนวก ง ตัวอย่างสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC<br>ที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10% โดยใช้ Fit Gaussian... | 78 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....   | 80 |

## สารบัญตาราง

๘

บทที่

หน้า

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 2.1 สมบัติด้านต่างๆของแกรไฟต์และเพชร.....              | 7  |
| ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยในกระบวนการสปีตเตอริงของฟิล์ม DLC..... | 12 |
| ตารางที่ 2.3 สรุปแถบพลังงานของฟิล์ม DLC และฟิล์มเพชร.....       | 26 |
| ตารางที่ 2.4 สรุปค่าสภาพนำไฟฟ้าและแถบพลังงานของฟิล์ม DLC.....   | 26 |



ศูนย์วิทยพัทยาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพชร.....  | 6    |
| รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์ทั้งหมด.....  | 6    |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างระบบคาร์บอนแบบอสัณฐานในเฟสต่างๆ<br>สัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจน $sp^3$ และ $sp^2$ ไฮบริดออร์บิทัล.....   | 8    |
| รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของระบบ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง.....   | 9    |
| รูปที่ 2.5 การเจือด้วยสารอะตอมกลางแบบพี.....  | 13   |
| รูปที่ 2.6 การเจือด้วยสารอะตอมกลางแบบเอ็น.....  | 15   |
| รูปที่ 2.7 แสดงผลของรามานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจน<br>กำลังไฟฟ้าหนาแน่น $20 \text{ W/cm}^2$ บนเวเฟอร์ซิลิคอน..... | 16   |
| รูปที่ 2.8 แสดงปริมาณของโครงสร้าง $sp^2$ ที่ปริมาณ $N_2$ ต่างๆบนวัสดุรองรับ<br>เวเฟอร์ซิลิคอน.....                        | 17   |
| รูปที่ 2.9 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีก G ที่ กำลังความหนาแน่นต่างๆ.....   | 17   |
| รูปที่ 2.10 แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์ม DLC ไม่เจือและ แสดงผลลักษณะ<br>ผิวหน้าฟิล์ม ที่ใส่สารเจือไนโตรเจน.....               | 18   |
| รูปที่ 2.11 แสดงกระแสของฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัส.....   | 19   |
| รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะผิวหน้าฟิล์มDLC ที่ของความเข้มข้นต่างๆ.....   | 19   |
| รูปที่ 2.13 แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์ม DLC ไม่เจือและ แสดงผล<br>ลักษณะผิวหน้าฟิล์มเจือซัลเฟอร์.....                         | 21   |
| รูปที่ 2.14 รามานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC ที่ปริมาณสารซัลเฟอร์ ที่ 0 ppm<br>50 ppm และ (c) 100 ppm ตามลำดับ.....              | 22   |
| รูปที่ 2.15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC โดย ฟิล์ม DLCไม่เจือและ<br>ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์.....                              | 22   |
| รูปที่ 2.16 รามานสเปกตรัมของฟิล์มเพชร (a) ฟิล์มDLCเจือซัลเฟอร์ร่วมกับโบรอน<br>และ (b)ฟิล์ม DLC ซึ่งเจือโบรอน.....         | 23   |
| รูปที่ 2.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มDLCที่ $900^\circ\text{C}$ ที่อัตราส่วน S/Pเท่ากับ 0.16,<br>0.32 และ 0.96.....           | 24   |
| รูปที่ 2.18 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ 300K กับปริมาณซัลเฟอร์ ที่เตรียมโดย<br>อุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน.....               | 24   |

| บทที่  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะผิวหน้าฟิล์มDLC ที่ของความเข้มข้นต่างๆ.....                                | 25   |
| รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ที่1000 ppm..... | 25   |
| รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบชนิดรามาานของคาร์บอนชนิดต่างๆ.....  | 28   |
| รูปที่ 2.22 รามาานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC แสดงตำแหน่งและความสูงของพีค D และพีคG....                 | 29   |
| รูปที่ 2.23 Deconvolution ของรามาานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC พิตกราฟโดยใช้ Gaussians....              | 29   |
| รูปที่ 2.24 หลักการวัดแบบ double beam.....   | 30   |
| รูปที่ 2.25 ตัวอย่างสเปกตรัมการส่องผ่านฟิล์ม DLC.....  | 31   |
| รูปที่ 2.26 ตัวอย่างฟิล์ม DLC ฟลัดโดยใช้ สมการ Tauc.....   | 31   |
| รูปที่ 2.27 ช่วงของสภาพนำไฟฟ้า ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ โลหะ.....                                | 32   |
| รูปที่ 2.28 การวัดความต้านทานไฟฟ้าชนิด 2 ขั้ว.....   | 33   |
| รูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....                            | 34   |
| รูปที่ 2.30 การเกิดโพลาริไรซ์แบบวงรีแบบสะท้อนกับชิ้นงาน.....                                     | 35   |
| รูปที่ 2.31 หาค่าความหนาของชั้น SiO <sub>2</sub> ของตัวรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน.....                 | 36   |
| รูปที่ 2.32 หาค่าความหนาของชั้นฟิล์มบนตัวรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน.....                               | 36   |
| รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายของระบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริ่งที่ใช้ในงานวิจัย.....                          | 38   |
| รูปที่ 3.2 เครื่องอัดไฮโดรลิก และเป้าที่ใช้ในการทดลอง.....                                       | 38   |
| รูปที่ 3.3 ภาพกายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL<br>รุ่น JSM-6480LV .....         | 40   |
| รูปที่ 3.4 ภาพถ่าย รามาานสเปกโทรสโกปี ยี่ห้อ Renishaw invia.....                                 | 40   |
| รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม.....   | 41   |
| รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่องยิวีวีลิสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo<br>รุ่น T90+UV/VIS.....        | 41   |
| รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบหลักเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี.....                                  | 42   |
| รูปที่ 4.1 ฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10% ต่อค่าสภาพนำไฟฟ้า.....                 | 43   |
| รูปที่ 4.2 สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่อุณหภูมิ pyrolysis 700°C 800°C และ 900°C....               | 44   |
| รูปที่ 4.3 ฟิล์ม DLC และ ฟิล์ม DLCที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์10%<br>ต่อค่าสภาพนำไฟฟ้า.....    | 45   |

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.4 ตัวอย่างของค่า n และ k ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 2%.....  | 46   |
| รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของค่า n และ k ของฟิล์ม DLC โดยวิธี pulsed laser ablation<br>ArF ที่ 193 nm บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน.....   | 46   |
| รูปที่ 4.6 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%<br>โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....   | 47   |
| รูปที่ 4.7 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%<br>โดยสเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต.....  | 47   |
| รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%<br>โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และ สเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต.....                         | 48   |
| รูปที่ 4.9 แถบพลังงาน โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC<br>ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%.....  | 49   |
| รูปที่ 4.10 แถบพลังงาน โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และสภาพการไฟฟ้าของฟิล์ม<br>DLC เจ็พอสฟอรัส 0-7% .....   | 49   |
| รูปที่ 4.11 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10% ความต่างศักย์<br>400-500V และที่เวลา 30-45 min โดยสเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต.....                     | 50   |
| รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนความดัน $8 \times 10^{-2}$ torr<br>ความต่างศักย์ 500 V .....   | 51   |
| รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบนตัวรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนความดัน $8 \times 10^{-2}$ torr<br>ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (a) 9 (b) 12.75 (c) 16.65 (d) 18.5 W/cm <sup>2</sup> ..... | 52   |
| รูปที่ 4.14 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0-10% โดย cross section จาก SEM.....   | 53   |
| รูปที่ 4.15 Cross-sectional จาก SEM ที่ 8% doped บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน.....   | 53   |
| รูปที่ 4.16 กราฟคาลิเบรชันจากการศึกษาชุดการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่ปริมาณซัลเฟอร์<br>0,1,5,10 และ 25 %.....  | 54   |
| รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบปริมาณซัลเฟอร์ในฟิล์มต่อปริมาณซัลเฟอร์ในเป้าที่ใช้ในการทดลอง.....  | 54   |
| รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์ม และในเป้าที่ฟอสฟอรัส 1,3,5,7 โดยมวล.....   | 55   |
| รูปที่ 4.19 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 2% เวลา 30-75 นาที.....  | 55   |
| รูปที่ 4.20 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0-10% ที่ความต่างศักย์ 400-500V<br>เวลา 30-75 นาที.....  | 56   |

| บทที่  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.21 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0-25% ที่เลเซอร์ 10-20 J/cm <sup>2</sup><br>และอุณหภูมิวัสดุรองรับ 150 และ 250 °C .....                                 | 56   |
| รูปที่ 4.22 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0-10% ที่เวลา 30-75 นาที.....   | 57   |
| รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC และ เป้าแกรไฟต์.....  | 58   |
| รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อ<br>ซัลเฟอร์ 2-10%.....   | 58   |
| รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนปริมาณ<br>คาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10 %.....  | 59   |
| รูปที่ 4.26 อัตราส่วนความเข้มของ I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub> และ ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิง<br>แบบรามานที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%..... | 59   |
| รูปที่ 4.27 อัตราส่วนความเข้มของ I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub> และ ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการ<br>กระเจิงแบบรามานที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า.....                   | 60   |
| รูปที่ 4.28 อัตราส่วนความเข้มของ I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub> จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่<br>ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 6.7-20 Wcm <sup>-2</sup> .....             | 61   |
| รูปที่ 4.29 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อ<br>ซัลเฟอร์ 2% ที่เวลา 30-75 min.....  | 61   |
| รูปที่ 4.30 ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วน<br>ปริมาณคาร์บอน ต่อซัลเฟอร์ 2 % ที่เวลา 30-75 min.....  | 62   |
| รูปที่ 4.31 อัตราส่วนความเข้มของ I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub> จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตรา<br>ส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 2% ที่เวลา 30-75 min.....      | 62   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เพชร (Diamond) เป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษเฉพาะตัวที่โดดเด่น ทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้า เช่น มีความแข็งที่สุด มีความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าสูง เชื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ฯลฯ ด้วยสมบัติดังกล่าวทำให้เพชรมีมูลค่าสูงในเชิงพาณิชย์ และเนื่องจากเพชรธรรมชาติมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายอย่าง และมีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ทำการวิจัยและพยายามที่จะสังเคราะห์พัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติเหมือนหรือใกล้เคียงเพชรให้มากที่สุด จนสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (Diamond liked carbon, DLC) สมบัติโดยทั่วไปของฟิล์ม DLC ได้แก่ มีค่าความแข็งสูง ทนต่อรอยขีดข่วนและทนต่อการสึกกร่อนได้ดี จากสมบัติต่างๆ เหล่านี้ทำให้ฟิล์ม DLC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้หลากหลายด้าน เช่นเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางด้านไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ [1,2,3,4]

นักวิทยาศาสตร์พยายามที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม DLC โดยการพัฒนาสมบัติสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ด้วยการเจือ ซึ่งมี 2 แนวทาง คือการเจือด้วยโบรอนหรือ ไฮโดรเจนลงบนฟิล์ม DLC เพื่อทำหน้าที่เป็นอะตอมตัวรับ ทำให้ฟิล์ม DLC มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และการเจือด้วยไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสเพื่อทำหน้าที่เป็นอะตอมตัวให้ ทำให้ฟิล์ม DLC มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในงานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นทางด้านการทำฟิล์ม DLC เป็นชนิดพีซึ่งทำได้ง่ายและในปัจจุบันงานวิจัยที่ปรับปรุงลักษณะของฟิล์ม DLC เป็นชนิดพีค่อนข้างจะประสบความสำเร็จแล้ว ส่วนการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC มีลักษณะเป็นชนิดเอ็น เป็นการทำให้ยากมาก เพราะอะตอมตัวให้ส่วนใหญ่เป็นอะตอมที่มีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของคาร์บอน ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวโครงสร้างของฟิล์ม DLC ได้ อย่างไรก็ตามได้มีนักวิทยาศาสตร์สามารถสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ชนิดเอ็นโดยไม่ทำลายโครงสร้างของฟิล์ม Dr. Koizumi และคณะพบว่า การใส่สารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์ม DLC ให้ค่าแถบพลังงานกระตุ้น (activation energy) ในช่วง 0.49 - 0.60 eV ทำให้ค่าความต้านทานสูง เนื่องจากฟอสฟอรัสส่วนใหญ่แตกตัวทำให้มีปริมาณความเข้มข้นพาหะในชั้นแถบการนำ (conduction band) มีค่าน้อย เมื่อสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือด้วยไนโตรเจนพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง  $5.3 \times 10^{-13} - 1.14 \times 10^{-10} (\Omega\text{-cm})^{-1}$  แถบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 1.7 eV และ I. Sakaguchi และคณะ สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือด้วยซิลเฟอร์พบว่าค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $10^8 - 10^{12} (\Omega\text{-cm})^{-1}$  ค่าแถบพลังงานกระตุ้นของซิลเฟอร์มีค่า 0.380 eV การใช้พลังงานกระตุ้นน้อยแสดงว่าฟิล์มจะมีสภาพความต้านทานที่ต่ำและนำไฟฟ้าได้ดี



เหตุจูงใจในการใช้วิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริงสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เนื่องจากเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้ฟิล์มที่มีคุณภาพ มีการยึดเกาะกับวัสดุรองรับดี และสามารถสังเคราะห์ฟิล์ม DLC บนวัสดุรองรับได้หลายชนิด เช่น กระจกสไลด์ ซิลิคอน เซรามิกส์ อลูมิเนียม ฯลฯ [5] โดยกลไกในการสังเคราะห์อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) จากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้า และอนุภาคพลังงานสูงที่ใช้ในกระบวนการโดยทั่วไปจะใช้ไอออนของแก๊ส เพราะสามารถเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการวิเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือด้วยซัลเฟอร์ โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ ความต่างศักย์ เวลาที่ใช้ในการสเปคเตอริง
2. ศึกษาสมบัติของฟิล์ม DLC จากข้อ 1 ที่โดบด้วยซัลเฟอร์ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาผลการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ในสภาวะต่างๆดังนี้
  - อัตราส่วนของคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ที่ใช้เป็นเป้า
  - ค่าความต่างศักย์
  - เวลาที่ใช้ในการสเปคเตอริง
2. ทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้
  - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC
  - รามานสเปกโทรสโกปี เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างฟิล์ม DLC
  - วัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม
  - อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectrophotometer)
  - สเปกโตรสโคปีกอิทธิลิปไซเมทรี (Spectroscopic Ellipsometry)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่มีต่อลักษณะเฉพาะของรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มซึ่งเชื่อมโยงคุณสมบัติของฟิล์มที่ดีขึ้น
2. เป็นต้นแบบในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเจือด้วยซิลเฟออร์ โดยนำไปใช้ในงานด้านสารกึ่งตัวนำ และการใช้งานในลักษณะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. อัดเป้าคาร์บอนผสมกับซิลเฟออร์ในอัตราส่วนของซิลเฟออร์ตั้งแต่ 0-10% โดยโมล
2. สังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้
  - อัตราส่วนของคาร์บอนต่อซิลเฟออร์ที่ 0-10% โดยโมล
  - ความต่างศักย์ที่ใช้ในการสเปกโตรอิเล็กโทรลิซิสในช่วง 400-500 V
  - เวลาที่ใช้ในการสเปกโตรอิเล็กโทรลิซิส 30-75 นาที
3. ทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม DLC โดยใช้
  - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวฟิล์ม DLC และความหนาจาก cross section
  - รามานสเปกโทรสโกปีเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม DLC
  - วัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม
  - ยူวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาพลังงานกระตุ้น (optical band gap)
  - สเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อใช้ในการคำนวณหาพลังงานกระตุ้น (energy band gap) และความหนาของฟิล์ม
4. อภิปราย สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท รายละเอียดในแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาของปัญหาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ของการวิจัยและลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของ DLC รูปแบบของคาร์บอนในโครงสร้างของฟิล์ม DLC กระบวนการสเปกโตรอิเล็กโทรลิซิสของฟิล์ม DLC การเจือด้วยสารในฟิล์ม DLC เทคนิคการ

สังเคราะห์ฟิล์ม DLC งานวิจัยในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเจ็ดด้วยโบรอน ไอโอดีน ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ในฟิล์มเพชร นอกจากนี้ยังประกอบด้วยทฤษฎีเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด การวิเคราะห์ทางรามาน ทฤษฎียูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี และการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC โดยเทคนิค two probe

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการทดลองซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการอัดเป่าที่ใช้ในระบบ และส่วนที่ 2 เป็นการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ตรวจสอบสมบัติของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด รามานสเปกโทรสโกปี และ วัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม และ คำนวณค่าแถบพลังงานของฟิล์ม DLC โดยยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยแบ่งออกเป็นสมบัติทางด้านสภาพนำไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางโครงสร้าง และสมบัติทางแสง

บทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

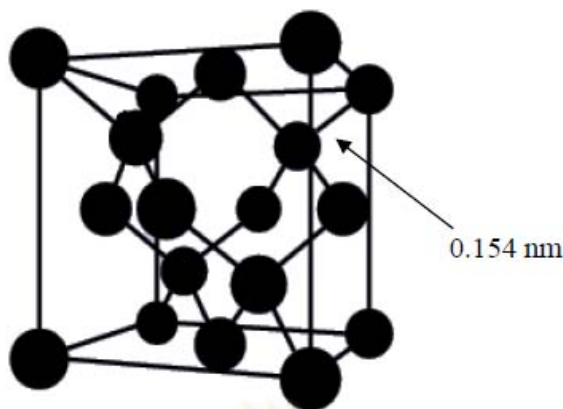
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับฟิล์ม DLC ได้แก่รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนและเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเฉพาะเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง การใส่สารเจือในฟิล์ม DLC ในระบบสปัตเตอริง วิธีการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รามานสเปกโทรสโกปี อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี สเปกโตรสโคปีอัลลิปิโซเมทรี และวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม

#### 2.1 รูปแบบของคาร์บอนในโครงสร้างผลึก

ธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในฟิล์ม DLC ในการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนจะมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มคาร์บอนเป็นธาตุหมู่ 4 มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic configuration) เป็น  $1s^2 2s^2 2p^2$  เมื่อคาร์บอนเกิดสารประกอบจะจัดตัวใหม่โดยจะสร้างพันธะโคเวเลนต์ใช้อิเล็กตรอนร่วมกับธาตุอื่น เพื่อให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนครบ 8 จึงทำให้เกิดไฮบริดไดเซชันซึ่งเป็นไปได้ทั้ง  $sp^1$   $sp^2$  และ  $sp^3$  ไฮบริดไดเซชันซึ่งขึ้นกับว่าอะตอมของคาร์บอนจะใช้อิเล็กตรอนเดี่ยวในการเกิดพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมอื่น โดยอัญรูปของคาร์บอน (Allotropism) เป็นปรากฏการณ์ที่ธาตุเกิดได้มากกว่าหนึ่งรูปแบบเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในของแข็งแตกต่างกันเช่นเพชรและแกรไฟต์ [8]

##### 2.1.1 เพชร

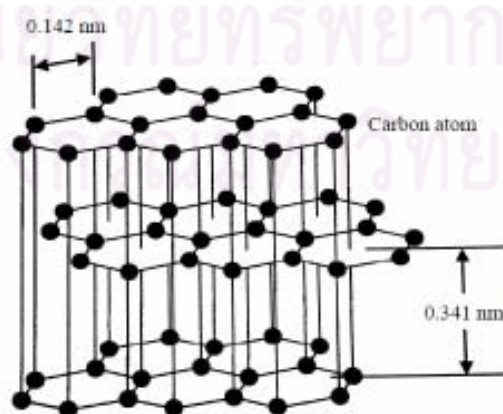
โครงสร้างของเพชรเป็นโครงสร้างที่ค่อนข้างเปิด (สัดส่วนการบรรจุ = 0.34 และแบบบรรจุแน่นจะมีสัดส่วนการบรรจุ = 0.74) คาร์บอนแต่ละอะตอมจะสร้างพันธะโคเวเลนต์กับคาร์บอนอะตอมอื่น 4 อะตอม ซึ่งอยู่ที่มุมของรูปทรงสี่หน้าและแต่ละอะตอมของคาร์บอนที่มุมของทรงสี่หน้านั้นก็สร้างพันธะกับคาร์บอนอีก 3 อะตอมต่อไป โครงสร้างของเพชรจึงมีลักษณะเป็นตาข่ายในสามมิติซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนมากมายมาต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงจำนวนมากและมีทิศทาง ต่อกันได้เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่มาก เพชรจึงมีความแข็งแรงมาก [8]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพชร [8]

### 2.1.2 แกรไฟต์

อะตอมของคาร์บอนจะจัดตัวเป็นวงรูปหกเหลี่ยมเรียงต่อกันในระนาบเดียวกัน โดยคาร์บอนแต่ละอะตอมจะล้อมรอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม ซึ่งทำมุม 120 องศาซึ่งกันและกัน อะตอมของคาร์บอนเหล่านี้จะสร้างพันธะซิกมาซึ่งกันและกัน จากการซ้อนเหลื่อมของ  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัลแล้วแต่ละอะตอมของคาร์บอนซึ่งยังคงมี p-ออร์บิทัลที่ไม่เกิดไฮบริดไดเซชัน และอยู่ในทิศทางที่จะทำให้เกิดการซ้อนเหลื่อมของ  $p\pi - p\pi$  ได้ จึงทำให้มีหมอกของ  $\pi$  อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ตลอดแผ่นของแกรไฟต์ทั้งข้างบนและข้างล่างระนาบอะตอมของคาร์บอน การที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระในหมอกของ  $\pi$  อิเล็กตรอนนั่นเอง จึงทำให้แกรไฟต์สามารถนำไฟฟ้าได้ ถ้าพิจารณาโครงสร้างจะเห็นว่าระนาบของอะตอมคาร์บอนแต่ละระนาบจะซ้อนกันเป็นขั้นๆ โดยในแต่ละชั้นอะตอมของคาร์บอนจะอยู่ใกล้กัน (141pm) มากกว่าระยะห่างระหว่างแต่ละระนาบ (335pm) ทั้งนี้เพราะแต่ละระนาบของคาร์บอนไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์แต่ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งมีค่าน้อย [8]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์ทั้งหมด [8]

### 2.1.3 สมบัติของแกรไฟต์และเพชร

เนื่องจากแกรไฟต์จะมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นแบบเฮกซะโกนอล มีไฮบริดออร์บิทัลเป็นแบบ  $sp^2$  ส่วนเพชรจะมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นแบบทรงสี่หน้า และมีไฮบริดออร์บิทัลเป็นแบบ  $sp^3$  จากโครงสร้างและไฮบริดไดเซชันที่แตกต่างกันของแกรไฟต์และเพชร ส่งผลให้สมบัติของเพชรและแกรไฟต์แตกต่างกันด้วย ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของแกรไฟต์และเพชร ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สมบัติด้านต่างๆของแกรไฟต์และเพชร [9]

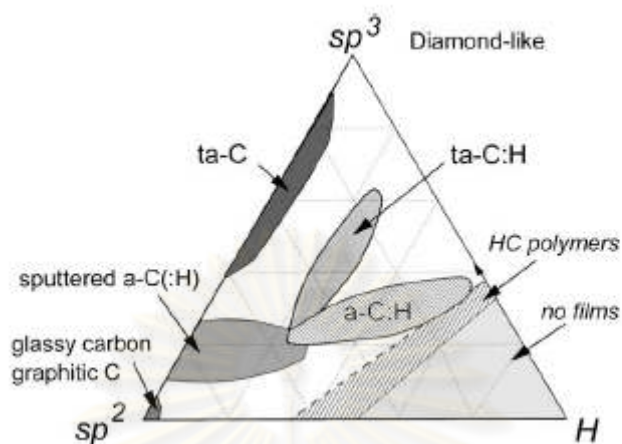
| สมบัติ  | แกรไฟต์          |            | เพชร        |
|---|------------------|------------|-------------|
|   | In plane         | Transverse |             |
| ความหนาแน่น ( $g.cm^3$ )                        | 2.267            |            | 3.515       |
| สภาพคล่องของอิเล็กตรอน ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ ) | $20 \times 10^3$ | 100        | 2200        |
| สภาพคล่องของโฮล ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ )        | $15 \times 10^3$ | 90         | 1600        |
| แถบพลังงาน (eV)                                 | 0.04             |            | 5.45        |
| สภาพความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega.cm$ )            | $10^{-4}$        | 1          | $>10^{14}$  |
| ความแข็ง (GPa)                                  | soft             |            | 79-102      |
| ไฮบริดไดเซชัน                                   | 100% $sp^2$      |            | 100% $sp^3$ |
| การนำไฟฟ้า ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )                | $<4180$          | 2          | 2000        |
| การส่องผ่าน                                     | Opaque           |            | UV-VIS-IR   |
| ความยาวพันธะ ( $^{\circ}A$ )                    | 1.421            | 3.410      | 1.545       |
| ความแข็งแรงของพันธะ                             | 524              | 7          | 349         |

## 2.2 พิล์ม DLC

### 2.2.1 โครงสร้างของฟิล์ม DLC

ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (Diamond-Like Carbon; DLC) หรือ ฟิล์ม DLC เป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) โดยสมบัติของฟิล์มขึ้นกับอัตราส่วนของ  $sp^3$  ต่อ  $sp^2$  และปริมาณของไฮโดรเจนในฟิล์มกล่าวคือในส่วนบริเวณที่มี  $sp^2$  มากฟิล์มที่ได้จะมีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบและมีสมบัติใกล้เคียงกับแกรไฟต์ และในบริเวณที่มีไฮโดรเจนอยู่ปริมาณน้อยหรือแทบจะไม่มี

อยู่เลยจะมีสัดส่วนของ  $sp^3$  มากบริเวณนี้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับเพชร แต่บริเวณที่มีปริมาณไฮโดรเจน อยู่มากจะไม่เกิดฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างระบบคาร์บอนแบบอสมมูลฐานในเฟสต่างๆ สัมพันธ์กับปริมาณ ไฮโดรเจน  $sp^3$  และ  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัล [7,8]

### 2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC [2]

เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC มีหลากหลายเทคนิค ซึ่งสามารถจำแนกหลักการ พื้นฐานของเทคนิคต่างๆ เหล่านี้เป็น 2 กลุ่มคือ

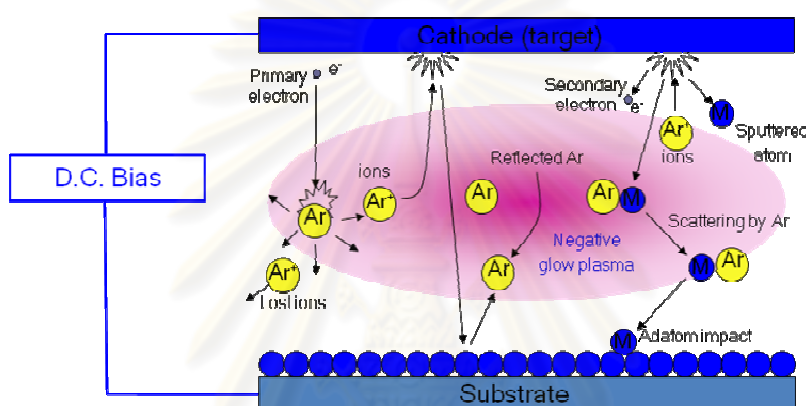
กลุ่มที่ 1 ได้แก่ กลุ่มการตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) การสังเคราะห์ฟิล์ม CVD เป็นการกระตุ้นสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะแก๊สให้เกิดการตกสะสมเป็นสารในสถานะของแข็ง โดยสามารถจำแนกการสังเคราะห์ฟิล์มแบบ CVD ตามวิธีการที่ใช้กระตุ้นแก๊ส เช่น แบบไส้ความร้อน (Hot Filament; HF) หรือเสริมด้วยพลาสมา (Plasma Enhanced; PECVD) จากแหล่งกำเนิดชนิดต่างๆ ทั้งกระแสตรง (DC) คลื่นวิทยุ (RF) หรือคลื่นไมโครเวฟ

กลุ่มที่ 2 ได้แก่ กลุ่มการตกสะสมเชิงกายภาพ (Physical Vapor Deposition; PVD) อย่างเช่น การยิงลำไอออน (Ion beams) และการสปัตเตอริงด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หรือกระแสสลับที่ความถี่คลื่นวิทยุ (RF Sputtering)

### 2.3 การสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคสปัตเตอริง [10,11]

การสปัตเตอริงค้นพบเป็นครั้งแรกโดยนาย Grove ในปี ค.ศ.1852 การสปัตเตอริง (Sputtering) คือการที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ออกมาด้วยเนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าภายใต้ระบบสุญญากาศ โดยเป้าที่ใช้เป็นได้ทั้งโลหะและอโลหะ และอนุภาค

พลังงานสูงที่ใช้ในกระบวนการโดยทั่วไปจะใช้ไอออนของแก๊สเป็นอนุภาคพลังงานสูง เพราะสามารถเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นได้ง่าย การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่เคลือบให้ดีขึ้นเช่น ความแข็งแรง การป้องกันการสึกกร่อน เพื่อให้มีความเสียดทานต่ำ ลดการกัดกร่อน ความสวยงาม สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า โดยการเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการเริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ เมื่อสารเคลือบตกกระทบบนผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของระบบ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

### 2.3.1 ผลของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง[12]

ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองเช่น เวลา ความต่างศักย์ กระแสและความดันที่ใช้ในการสปัตเตอริงต่างก็มีอิทธิพลต่ออัตราการเคลือบฟิล์ม และเป็นปริมาณที่ขึ้นต่อกันในทางปฏิบัติจึงเลือกที่จะละเลยตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด ควบคุมตัวแปรอีกตัวให้คงที่แล้วจึงศึกษาตัวแปรที่สนใจ จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์มบาง (R) กระแส (I) และความต่างศักย์ (V) ความดันแก๊ส (P) และระยะห่างระหว่างเป้าถึงวัสดุรองรับ(L) สามารถเขียนโดยประมาณได้ว่า

$$R \propto \frac{IV}{Pl} \quad (1)$$

#### 2.3.1.1 เวลา

ในการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสปัตเตอริงเพื่อวิเคราะห์ผลของการเพิ่มความหนาของฟิล์มต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรืออัตราเคลือบฟิล์มน่าจะเป็นสิ่งแรกที่เป็นจุดสนใจเมื่อพิจารณาจากกลไกและสภาพแวดล้อม กล่าวได้ว่าอัตราการเคลือบฟิล์มขึ้นกับปริมาณของอะตอมของ



เป้าที่ถูกสปัตเตอริงและการขนส่งอะตอมไปยังวัสดุรองรับ โดยอัตราการเคลือบฟิล์มจะสูงถ้าอะตอมของเป้าถูกสปัตเตอริงออกมาได้มากและสามารถเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับได้สะดวก

### 2.3.1.2 เปอร์เซนต์สารเจือ

การเจืออะตอมของสารอื่นเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นไม่บริสุทธิ์ ซึ่งมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณของสารที่เจือลงไป ในสารกึ่งตัวนำและเงื่อนไขในการสังเคราะห์ด้วย

### 2.3.1.3 กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ของผิวเป้า

กระแสของการดิสชาร์จเป็นตัวชี้ปริมาณของไอออนที่ชนเป้าซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณของอะตอมที่ถูกสปัตเตอริง และต่อเนื่องถึงปริมาณที่อะตอมสามารถไปถึงวัสดุที่รองรับ ดังนั้นอัตราการเคลือบฟิล์มจึงขึ้นกับกระแสการดิสชาร์จ และความต่างศักย์ ก็เป็นตัวแปรที่กำหนดพลังงานของไอออนบวทขณะชนเป้า ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจึงมีผลต่ออัตราการเคลือบฟิล์ม เมื่อเพิ่มความต่างศักย์จะมีผลให้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความต่างศักย์ก็อาจเป็นสาเหตุที่ไปลดอัตราการเคลือบฟิล์มเช่นกันโดยเฉพาะในระบบที่มีความดันในระบบต่ำ เนื่องจากไอออนบวทพลังงานสูงสามารถทำให้อะตอมจากการสปัตเตอริงที่ไปกระทบเป้ามียพลังงานจลน์สูงพอที่จะสปัตเตอริงฟิล์มได้ไปชนกับโมเลกุลของแก๊สในระหว่างการเคลื่อนที่ออกจากเป้าไปยังวัสดุรองรับโดยที่ความถี่ของการชนสูงขึ้นเมื่อความดันแก๊สสูงขึ้น ผลของการชนทำให้อะตอมเหล่านี้เกิดการกระเจิงและเปลี่ยนทิศทาง

### 2.3.1.4 ระยะห่าง

ในการศึกษาผลของระยะห่างมีผลต่ออัตราการสปัตเตอริง โดยปกติการเพิ่มระยะห่างจากเป้าถึงวัสดุรองรับจะส่งผลต่อการชนของอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงกับอะตอมแก๊สเกิดการกระเจิงส่งผลให้อัตราการเคลือบฟิล์มลดลง

### 2.3.1.5 ความดัน

ผลของความดันพบว่าอะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอริงสามารถเคลื่อนที่ถึงวัสดุรองรับได้ง่ายที่ความดันต่ำและจะเกิดการแพร่ที่ความดันสูง ดังนั้นในการเพิ่มความดันจะเป็นการลดโอกาสที่อะตอมจะเคลื่อนที่ถึงตัวรองรับและทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มลดลง

## 2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสปัตเตอริง

ปัจจุบันการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยใช้เทคนิคสปัตเตอริงมีเงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาแตกต่างกัน เช่น ความดัน ระยะเวลาในการสังเคราะห์ วัสดุรองรับ ฯลฯ สามารถหาอ่านได้จากวารสารทั้งในและนอกประเทศ ขอยกตัวอย่างพอสังเขปดังนี้

Z. G. Lu, C. Y. Chung [13] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ใช้ความดันในการทดลอง  $1.8 \times 10^{-6}$  mbar เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้กำลังในการสปัตเตอริงคงที่ 100 W

ศึกษาอุณหภูมิวัสดุรองรับ Si/SiO<sub>2</sub>/Ti/Pt ในช่วง 200-600 °C และไบแอสที่ความต่างศักย์ -100V พบว่าเมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ก่อนข้างเรียบมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน มีความหนา 200 nm. เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรามานรุ่น Spex RamaLog 1430 พบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1550 cm<sup>-1</sup> และที่อุณหภูมิ 200 °C ปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1600 cm<sup>-1</sup> (Graphite band) แสดงพันธะ sp<sup>2</sup> และปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1300 cm<sup>-1</sup> (Disordered band) แสดงพันธะ sp<sup>3</sup> เมื่ออุณหภูมิตัวรองรับเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 200 °C อัตราส่วน I<sub>G</sub>/I<sub>D</sub> ลดลงและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 600 °C อัตราส่วน I<sub>G</sub>/I<sub>D</sub> จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุรองรับเพิ่มมากขึ้นทำให้พลังงานการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณของ sp<sup>2</sup> เพิ่มขึ้น

A.A.Onoprienko และคณะ [14] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงใช้เป้าแกรไฟต์ในบรรยากาศของอาร์กอน ที่ความดันคงที่ที่ 1 Pa ในงานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของกำลังในการสปัตเตอริง และวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม DLC โดยรามาน พบว่ากำลังการสปัตเตอริงในช่วง 50-400 W ทำให้อุณหภูมิของวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและโครงสร้างฟิล์ม DLC จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เมื่อกำลังการสปัตเตอริงที่ 400 W จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุรองรับมีค่าสูงสุดถึง 300 °C และกำลังการสปัตเตอริงในช่วง 400-650 W จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุรองรับลดลง โดยความร้อนจะเป็นตัวหยุดอัตราการเกิดฟิล์ม เมื่อวิเคราะห์โดยรามานโดยใช้เลเซอร์จาก Ar<sup>+</sup> ที่มีความยาวคลื่น 514.5nm เป็นตัวกระตุ้น ปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1580 cm<sup>-1</sup> (Graphite band) และปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1360 cm<sup>-1</sup> (Disordered band) เมื่อเพิ่มกำลังการสปัตเตอริงใน 50-400 W อัตราส่วน I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> เพิ่มขึ้น และกำลังการสปัตเตอริง 400-650 W อัตราส่วน I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ลดลง

Namwoong Paik และคณะ [15] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ชนิดแหล่งกำเนิดอนุภาคเป็นประจุลบ (negative ion source) โดยวิธีนี้มีประโยชน์คือให้อัตราการสังเคราะห์ที่สูง ฟิล์มมีความสม่ำเสมอ ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของพลังงานไอออนในช่วง 200-800 eV ใช้เป้าคาร์บอน 99.999% ในบรรยากาศของไอซีเซียม ความดันที่ใช้เกิดพลาสมา 10<sup>-4</sup> Torr อัตราการสปัตเตอริงคงที่ที่ 0.3-1 nm/s เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม DLC ด้วยรามานชนิด Double Lorentzian Line ที่ความยาวคลื่น 514.532 nm. พบว่าเมื่อให้พลังงานไอออนที่ 300 eV สมบัติของฟิล์ม DLC มีโครงสร้างแบบ sp<sup>2</sup> และเมื่อให้พลังงานไอออนที่ 800 eV ฟิล์ม DLC มีโครงสร้าง sp<sup>3</sup> และมีปริมาณ sp<sup>3</sup> มากถึง 65.3±1.4 % เนื่องจากโครงสร้าง sp<sup>3</sup> มีการถ่ายเทพลังงานสูง ปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1550 cm<sup>-1</sup> (Graphite band) และปรากฏพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1360 cm<sup>-1</sup> (Disordered band) และ อัตราส่วน I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ sp<sup>2</sup> เพิ่มขึ้น

M. Vojs และคณะ [16] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่มีลักษณะเป็นชั้นโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง บนวัสดุรองรับ CrCoMo โดยฟิล์มมีอุณหภูมิ 150 °C ศึกษาผลของแก๊สอาร์กอนและแก๊ส

ไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน เมื่อวิเคราะห์โดยรามานชนิด LabRam โดยใช้ He-Ne ที่ความยาวคลื่น 632.8 nm. ที่ 15 mW ปรากฏพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1580\text{ cm}^{-1}$  (Graphite band) และปรากฏพีค D (Disordered band) ของแกรไฟต์ที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ และพบว่าเมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 50 sccm เป็น 60 sccm ปรากฏพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1140\text{ cm}^{-1}$  แสดง โครงสร้างแบบ  $sp^2$  ฟิล์มมีลักษณะเป็นผลึกขนาดนาโน การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนอาร์กอนต่อไนโตรเจนทำให้มีปริมาณของ  $sp^2$  ลดลงทำให้ฟิล์มไม่เป็นระเบียบมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยในกระบวนการสputtering ของฟิล์ม DLC

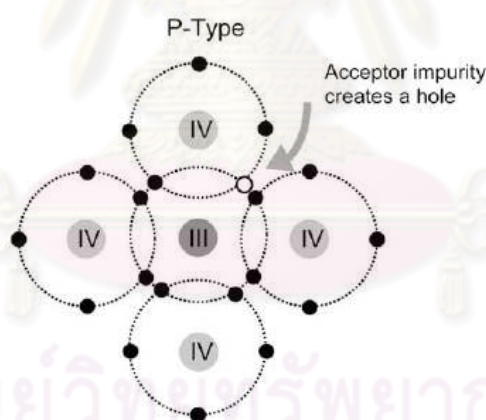
|                       |  |  |   |   |
|-----------------------|--|--|---|---|
| ผู้ทดลอง              | Z. G. Lu et al.,                       | A.A. Onoprienko et al.,  | Namwoong Paik   | M. Vojs, et al.,  |
| วัสดุรองรับ           | Si/SiO <sub>2</sub> /Ti/Pt             | Si-Ti-Al-O<br>เซรามิกส์  | Si(100)wafer,<br>กระจกสไลด์   | CrCoMo  |
| ความดัน               | $1.3 \times 10^{-3}$ (Torr)            | $7.5 \times 10^{-3}$ (Torr)  | $1 \times 10^{-4}$ (Torr)   | $7.5 \times 10^{-3}$ (Torr)   |
| เวลาการ<br>สังเคราะห์ | 1 ชั่วโมง                              | 10-180 นาที  | -   | -   |
| เงื่อนไข              | กำลังไฟฟ้า<br>กระแสตรงคงที่ที่<br>100W | ความดันคงที่ที่<br>1 Pa  | บรรยากาศของไอ<br>ซีเซียม  | สังเคราะห์ที่<br>อุณหภูมิ 150 °C  |
| ตัวแปร                | อุณหภูมิตัวรองรับ<br>200-600 °C        | กำลังการสputtering<br>50-650 W   | พลังงานไอออนในช่วง<br>200-800 eV  | ผลของอัตราส่วน<br>แก๊สAr/N <sub>2</sub>   |
| ผลSEM                 | ค่อนข้างเรียบ                          | จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ  | จัดเรียงตัวไม่เป็น<br>ระเบียบ   | เป็นผลึกขนาดนา<br>โน  |
| ผล raman              | โครงสร้าง $sp^2$                       | พีค G (Graphite)<br>$1580\text{ cm}^{-1}$ และพีค D<br>(Disordered) $1360\text{ cm}^{-1}$ | พีคG (Graphite)<br>$1550\text{ cm}^{-1}$ และพีค D<br>(Disordered) $1360\text{ cm}^{-1}$ | พีคG (Graphite)<br>$1580\text{ cm}^{-1}$ และ<br>พีคD ของแกรไฟต์<br>ไม่เป็นระเบียบ |

## 2.4 การใส่อะตอมสารเจือในฟิล์ม DLC [17]

### 2.4.1 การใส่อะตอมสารเจือแบบพี

สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการเติมธาตุเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน อินเดียม แกลเลียม อย่างใดอย่างหนึ่งลงไป ในอะตอมกลาง จะทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอมแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกันหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันได้ครบ 8 ตัว ส่วนอะตอมของธาตุเจือจะขาดอิเล็กตรอนอีก 1 ตัว เพราะธาตุเจือปนมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตัว เรียกส่วนที่ขาดอิเล็กตรอนนี้ว่าโฮล ซึ่งแปลว่า หลุม หรือ รู โฮลนี้จะแสดงประจุบวกออกมา

สารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีโฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่มาเชื่อมต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนใหญ่ (พาหะคืออิเล็กตรอนหรือโฮลที่เคลื่อนที่) จะทำให้อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปหาโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และก็เสมือนกับว่าโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเข้าไปหาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การเคลื่อนที่ของพาหะส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณใกล้รอยต่อพีเอ็น ในบริเวณใกล้รอยต่อนี้จะเป็นบริเวณปลอดพาหะเพราะมีแต่โฮลกับอิเล็กตรอนเท่านั้น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้านี้จะต้านการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองไม่ให้เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ เรียกสภาวะนี้ว่าสภาวะสมดุล



รูปที่ 2.5 การเจืออะตอมกลางแบบพี [17]

#### 2.4.1.1 การสังเคราะห์ฟิล์มDLC โดยใส่อะตอมสารเจือโบรอน

ในหัวข้อนี้ขอยกตัวอย่างงานวิจัยจากวารสารในต่างประเทศในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเจือด้วยสารโบรอน พอสังเขปดังนี้

I. Gerger และคณะ[18] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่มีการเจือโบรอนโดยวิธี hot-filament CVD (HF-CVD) บนวัสดุรองรับไททาเนียมซึ่งในการสังเคราะห์จะประกอบด้วย 2 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 pre-treatment โดยการนำวัสดุรองรับไททาเนียม มาขัดด้วยผงเพชรที่แขวนลอยในอะซิโตนโดยศึกษาผล

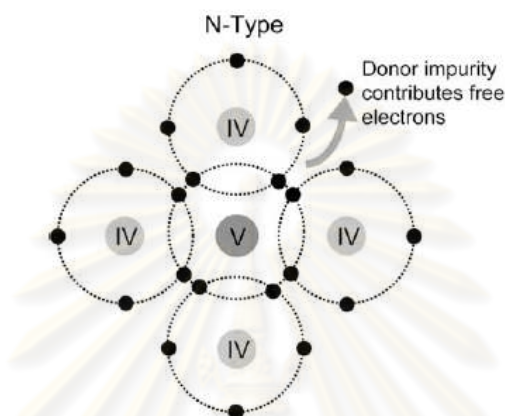
ของเวลา pre-treatment 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ในการสังเคราะห์จะเกิดขึ้นอินเทอร์มิเดียต Ti(C,B) ซึ่งเป็นผลดีทำให้ฟิล์มยึดเกาะกันแต่ระดับได้ดีขึ้น และชั้นอินเทอร์มิเดียตจะทำให้อัตราการสังเคราะห์และความหนาของฟิล์มลดลง เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของโบรอนต่อคาร์บอนเท่ากับ 6,000 ppm วิเคราะห์โดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูลักษณะพื้นผิวผลของการ pre-treatment พบว่าเมื่อใช้เวลาในการ pre-treatment 1 ชั่วโมง ลักษณะฟิล์มที่ได้มีพื้นผิวที่มีการยึดเกาะที่ดี เป็นเนื้อเดียวกัน มีการจัดเรียงตัวที่ผิวหน้าเป็นแบบ 111 และถ้าใช้เวลาในการ pre-treatment นาน 5 ชั่วโมง ฟิล์มที่ได้มีลักษณะโครงสร้างคล้ายลูกบอล และการสังเคราะห์ในขั้นที่ 2 ใช้เวลาในการสังเคราะห์นาน 16 ชั่วโมง ฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย

A. Sikora และคณะ [19] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่มีการเจือโบรอนโดยวิธี femtosecond laser ablation เป็นการยิงลำเลเซอร์ไปที่เป้าแกรไฟต์และโบรอน ซึ่งอยู่ภายในระบบ ทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาและเคลือบลงบนวัสดุรองรับ ในการทดลองปรับอัตราการสังเคราะห์โดยให้อัตราการสังเคราะห์ของแกรไฟต์  $34 \text{ nm min}^{-1}$  และอัตราการสังเคราะห์ของโบรอน  $21 \text{ nm min}^{-1}$  ศึกษาปริมาณของโบรอนที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ 2, 4 และ 8% ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 70-300 K พบว่าเมื่อวิเคราะห์โดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL 6500 F ฟิล์มมีลักษณะทรงกลมกระจายอยู่ทั่วไป ฟิล์มที่มีขนาดเล็กที่สุด 30 nm. มีโครงสร้างแบบอสัณฐานและฟิล์มที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 150 nm. มีโครงสร้างแบบผลึก เมื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิค four-probe เมื่ออุณหภูมิในช่วง 70-300 K พบว่าค่าความต้านทานมีแนวโน้มลดลงและที่อุณหภูมิ 300 K ความเข้มข้นของโบรอน 8% ค่าความต้านทานมากที่สุด  $57.74 \text{ k}\Omega$

R. Haubner [20] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเจือโบรอน ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์ แบบ Hot-filament Si(100) ชนิดพีเป็นวัสดุรองรับ เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าฟิล์มที่มีความเข้มข้นของโบรอนที่ผิวหน้าสูงฟิล์มที่สังเคราะห์ได้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นโบรอน 3% จะมีการจัดเรียงตัวแบบ 111 ที่ความเข้มข้นโบรอนน้อยกว่า 0.3% จะมีการจัดเรียงตัวแบบ 100 โดยลักษณะของรามานที่ความเข้มข้นโบรอนน้อยกว่า 0.3% จะมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของฟิล์ม DLC ที่ไม่ใส่สารเจือ ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเจือซัลเฟอร์ในระหว่างการสังเคราะห์จะเกิดปฏิกิริยาของ  $\text{H}_2\text{S}$  กับ  $\text{CH}_4$  เกิดเป็น CS แต่เมื่อในระบบมีอุณหภูมิสูงกว่า  $2,000^\circ\text{C}$  อุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงกว่า  $1,000^\circ\text{C}$  ปฏิกิริยาจะผันกลับส่งผลให้เกิด  $\text{H}_2\text{S}$  ทำให้นิวเคลียสของฟิล์มลดลง เมื่อวิเคราะห์โดยไม่โครรามานปรากฏฟีดไม่ชัดเจน

## 2.4.2 การใส่อะตอมสารเจือแบบเอ็น [17]

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการเติมสารเจือปนที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น ฟอสฟอรัส อาเซนิก อย่างใดอย่างหนึ่งลงไป ในอะตอมกลางคาร์บอน จะทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอมแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันได้ครบ 8 ตัว ทำให้เหลืออิเล็กตรอน 1 ตัว ที่ไม่สามารถจับตัวกับอะตอมข้างเคียง เรียกอิเล็กตรอนตัวนี้ว่า อิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะแสดงประจุลบออกมา แสดงดังรูปที่ 2.6

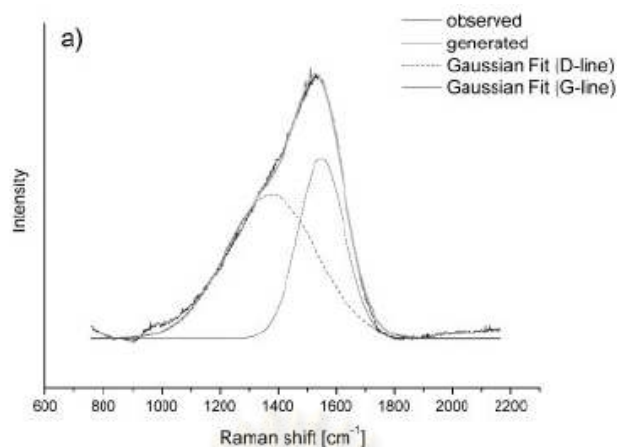


รูปที่ 2.6 การเจืออะตอมกลางแบบเอ็น [17]

### 2.4.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มDLC โดยใส่อะตอมสารเจือไนโตรเจน

โดยในหัวข้อนี้ขอยกตัวอย่างงานวิจัยจากวารสารต่างประเทศในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยใส่อะตอมสารเจือไนโตรเจน พอสังเขปดังนี้

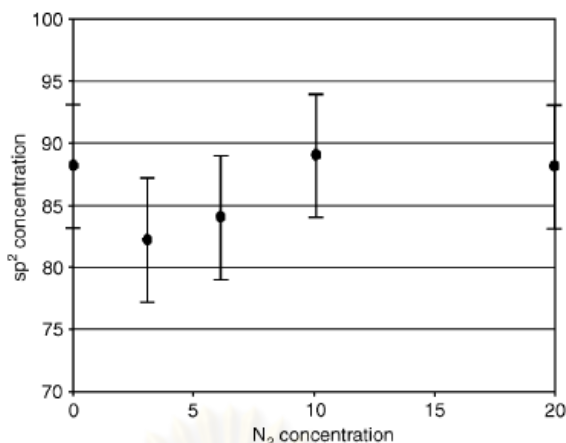
Markus Kahn และคณะ [21] สังเคราะห์ฟิล์มDLC เจือไนโตรเจนโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง บนวัสดุรองรับ Silicon wafers (100) และ กระดาษสไลด์ ความต่างศักย์ในช่วง 600- 700V โดยศึกษาผลของความหนาแน่นของกำลังในการสปัตเตอริงในช่วง 6.7-20 Wcm<sup>-2</sup> ผลของความดันในช่วง 1.3x10<sup>-3</sup>-3.43x10<sup>-3</sup> mbar และผลของปริมาณแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจนในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ เมื่อวิเคราะห์โดยรามานชนิด LabRam โดยใช้ Nd-YAG ที่ความยาวคลื่น 532 nm. ปรากฏพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1550 cm<sup>-1</sup> (Graphite band) และปรากฏพีค D ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1355 cm<sup>-1</sup> (Disordered band) และอัตราส่วน I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> มีค่า 1.56±0.04 ที่การสังเคราะห์ที่ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 6.7 W cm<sup>-2</sup> และพบว่าที่กำลังในการสปัตเตอริงต่ำจะทำให้ฟิล์มมีปริมาณของ sp<sup>3</sup> สูง



รูปที่ 2.7 แสดงผลของรามานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC โดยเจือด้วยไนโตรเจน กำลังไฟฟ้าหนาแน่น  $20 \text{ W/cm}^2$  บนเวเฟอร์ซิลิคอน (100) [21]

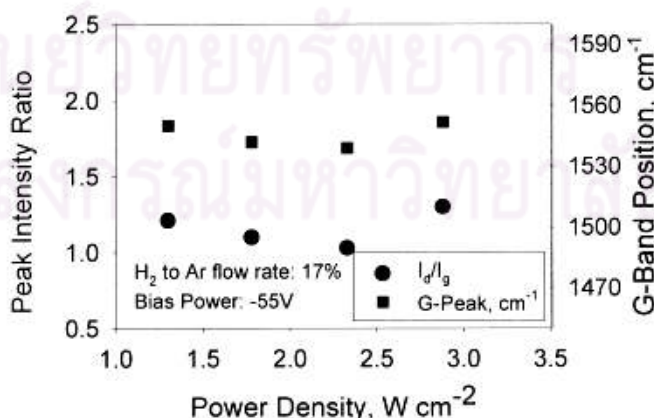
เมื่อศึกษาผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจน 5% ของแก๊สไนโตรเจนผสมกับแก๊สอาร์กอนพบว่า ในฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจนมีปริมาณของไนโตรเจนในฟิล์ม  $8.6 \pm 0.7\%$  และที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 30% ของแก๊สไนโตรเจนผสมกับแก๊สอาร์กอนพบว่าในฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจนมีปริมาณของไนโตรเจนในฟิล์ม  $14.4 \pm 0.9\%$  และที่ปริมาณของแก๊สไนโตรเจน 100% ฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจนมีปริมาณของไนโตรเจนในฟิล์ม  $25.7 \pm 1.6\%$  โดยอัตราการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนอสัณฐานมีปริมาณของ  $sp^3$  ลดลงเมื่อปริมาณของไนโตรเจนในฟิล์มมากขึ้น

T.Hamilton และคณะ[22] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจนโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง บนวัสดุรองรับ Silicon wafers (100) และ polytetrafluoroethylene (PTFE) ความต่างศักย์ในช่วง โดยศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนในบรรยากาศที่ปริมาณไนโตรเจนในช่วง 0% ถึง 20% ไบแอสความต่างศักย์บนวัสดุรองรับที่ -250 V พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นจนถึง 10% จะทำให้ปริมาณ  $sp^2$  เพิ่มขึ้นจาก 74% จนถึง  $92 \pm 5\%$  โดยให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับ Bhattacharyya et al., 2002; Papworth et al., 2000; Mezzasalma et al., 2003 ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนที่ 10% ทำให้ปริมาณของพันธะ  $sp^2$  มากที่สุดถึง  $92 \pm 5\%$  อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของลักษณะพื้นผิวฟิล์มขึ้นกับวัสดุรองรับซึ่งในการสังเคราะห์พบว่าวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน(100) จะให้ความหนาแน่นของพันธะ  $sp^2$  ในฟิล์ม DLC สูงกว่าวัสดุรองรับ polytetrafluoroethylene (PTFE)



รูปที่ 2.8 แสดงปริมาณของโครงสร้าง  $sp^2$  ที่ปริมาณ  $N_2$  ต่างๆ บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน(100)[22]

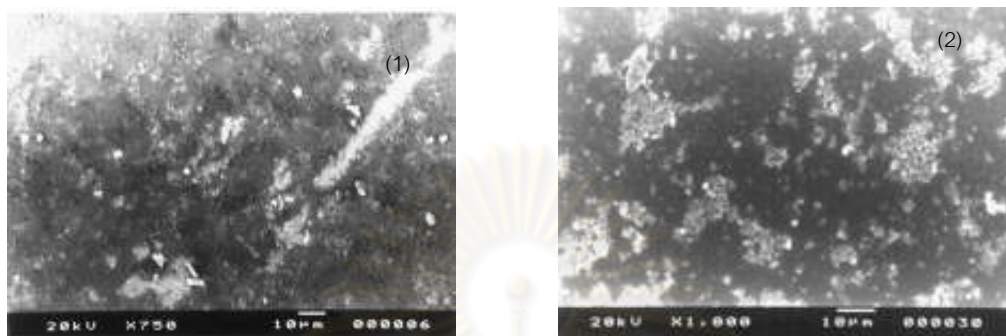
S. Zhang และคณะ[23] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจนโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน (100) และ KBr ความดันพื้นฐานในการสปัตเตอริง  $5 \times 10^{-5}$  torr ไปแอส ความต่างศักย์บนวัสดุรองรับที่ -50 V ถึง -200V ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในช่วง  $1-3 \text{ W cm}^{-2}$  โดยศึกษาผลของโครงสร้าง  $sp^2 / sp^3$  พบว่าเมื่อวิเคราะห์โดยรามานรุ่น Renishaw Model 127 โดยใช้เลเซอร์ He-Ne ที่ความยาวคลื่น 632.8 nm. ปรากฏพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1530 \text{ cm}^{-1}$  (Graphite band) และปรากฏพีค D ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1350 \text{ cm}^{-1}$  (Disordered band) เมื่อกำลังความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจนถึง  $2.5 \text{ W cm}^{-2}$  อัตราส่วน  $I_D/I_G$  และพีค G มีค่าลดลงทำให้เกิดฟิล์มที่มีโครงสร้าง  $sp^3$  เพิ่มขึ้น แต่เมื่อกำลังความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจนถึง  $3 \text{ W cm}^{-2}$  กลับพบว่าอัตราส่วน  $I_D/I_G$  และพีค G มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มที่โครงสร้าง  $sp^2$  (แกรไฟต์) เนื่องจากในการสังเคราะห์จะเกิดฟิล์มคาร์บอนอสัณฐาน(a-C) และฟิล์มคาร์บอนอสัณฐานที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบ(a-C:H)



รูปที่ 2.9 อัตราส่วน  $I_D/I_G$  และตำแหน่งพีค G ที่กำลังความหนาแน่นต่างๆ [23]



S. Kundoo และคณะ [24] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจน ทำในระบบการตกสะสมแบบอิเล็กโทรลิซิส (electrolysis) เมื่อตรวจลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น(JEOL, JSM 5200) พบว่า ฟิล์ม DLC ที่ไม่มีการเจือลักษณะพื้นผิวฟิล์มค่อนข้างเรียบ และพบเกรนที่พื้นผิวของฟิล์มที่มีการเจือของไนโตรเจน



รูปที่ 2.10 (1) แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์ม DLC ที่ไม่ใส่สารเจือ  
(2) แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์ม ที่เจือไนโตรเจน [24]

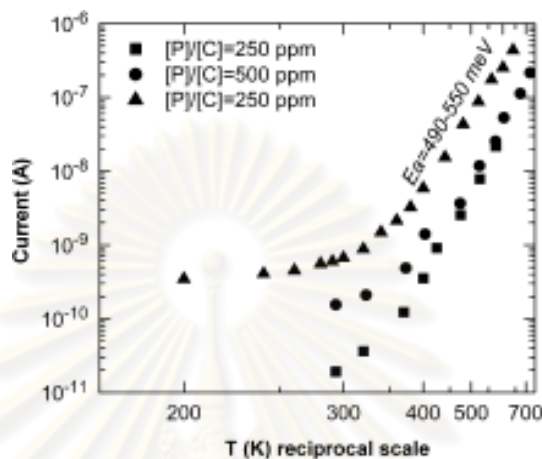
Hare Ran Aryal และคณะ [25] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจน โดยวิธี ไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  บนตัวรองรับซิลิคอน(100) และควอartz โดยใช้แก๊สอาร์กอน 200 sccm แก๊สอะซิทีลีน 10 sccm แก๊สไนโตรเจน 5 sccm กำลังไฟฟ้าคงที่ที่ 100 W ใช้เวลา 30 นาที ศึกษาผลของความดันตั้งแต่ 110-50 Pa พบว่าเมื่อสังเคราะห์ฟิล์มที่ 50 Pa จะให้ค่าแบนแกพที่น้อยที่สุด 1.6 eV เมื่อวิเคราะห์ด้วยรามาน พบว่าปรากฏพีกที่บริเวณ G (Graphite band) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1585\text{ cm}^{-1}$  ฟิล์มมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยวของแกรไฟต์ และปรากฏพีกที่บริเวณ D (Disordered band) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1345\text{ cm}^{-1}$  ฟิล์มจะมีความไม่สมบูรณ์ประกอบด้วยผลึกขนาดไมโครของแกรไฟต์

#### 2.4.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มDLC โดยใส่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

นอกจากการสังเคราะห์ฟิล์มDLC เจือไนโตรเจน ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลการสังเคราะห์ฟิล์มDLC เจือฟอสฟอรัสในระบบอื่นๆจึงขอยกตัวอย่างพอสังเขปดังนี้

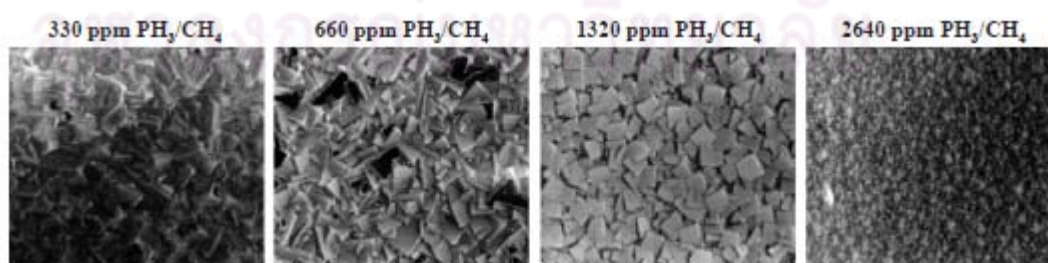
E. Gheeraert, N. Casanova [26] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัสโดยวิธีไมโครเวฟ ศึกษาผลของความเข้มข้นของแก๊สฟอสฟอรัสในช่วง 100-1500 ppm ในฟิล์ม DLC วิเคราะห์ผลโดยรามานพบว่าฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัสจัดเรียงผลึกแบบ 111 และมีค่าพลังงานกระตุ้นของการนำไฟฟ้า(Activation energy of the conductivity) ประมาณ 0.490-0.550 eV ที่ 400 K ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Dr. Koizumi และคณะ พบว่าการเจือฟอสฟอรัสในฟิล์ม DLC ให้ค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ในช่วง 0.49 - 0.60 eV ทำให้ค่าความต้านทานสูงเนื่องจากฟอสฟอรัส

ส่วนใหญ่ได้ถูกไอออไนซ์ทำให้มีปริมาณ carrier concentration ในชั้นแถบการนำ(conduction band) มีค่าน้อย และเมื่อวัดค่ากระแสที่ความเข้มข้นที่ 250 และ 500 ppm พบว่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 K ให้ค่าพลังงานกระตุ้น 0.490-0.550 และเชื่อว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400K จะมีการกระตุ้นน้อยและฟอสฟอรัสมีสารเจือปน สารฟอสฟอรัส ปริมาณความเข้มข้นและการเคลื่อนที่ สามารถที่จะกำหนดค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 กระแสของฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัส [26]

R. Haubner [20] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัส ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์ แบบ Hot-filament Si(100) ชนิดพีเป็นวัสดุรองรับ ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัส พบว่าที่ อัตราส่วนของแก๊สผสมระหว่าง  $\text{PH}_3$  กับ  $\text{CH}_4$  ที่ความเข้มข้น 660 ppm อุณหภูมิของวัสดุรองรับต่ำ ( $820^\circ\text{C}$ ) ความดันสูง (50-75 Torr) และอุณหภูมิของ filament ( $\sim 2300^\circ\text{C}$ ) จะได้ฟิล์ม DLC ที่ดีที่สุด เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์มมีลักษณะคล้ายลูกบอล อัตราการสังเคราะห์ของฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (330-1320 ppm) และอัตราการสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลงที่ความเข้มข้นของแก๊สผสมระหว่าง  $\text{PH}_3$  กับ  $\text{CH}_4$  (2640-5280 ppm) เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะพื้นผิวจะเปลี่ยนจาก 111 เป็น 100



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะพื้นผิวฟิล์ม DLC ที่ของความเข้มข้นต่างๆ [20]

S. Ghodbane และคณะ [27] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยวิธีไมโครเวฟ เจ็อฟอสฟอรัส บนวัสดุรองรับซิลิคอน โดยใช้แก๊ส  $\text{PH}_3$  และแก๊สผสม  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  เท่ากับ 0.15 % พบว่าที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  ความดัน 30 Torr วัตต์ค่าพลังงานกระตุ้น (exciton energy) มีค่าในช่วง 4.9 และ 5.4 eV เมื่อวิเคราะห์โดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น Quanta 200 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์น้อย (10 ชั่วโมง) จะได้ขนาดของเกรนลดลง เมื่อทดสอบโดยรามานรุ่น Jobin&Yvon LabRam ชนิด He-Cd laser ภายใต้การกระตุ้นที่ 325 nm ปรากฏพีกเดี่ยวที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1332\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกที่แสดงลักษณะเฉพาะของเพชร พบพันธะคาร์บอนเป็นแบบ  $\text{sp}^2$  พีกที่บริเวณ Graphite band ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1572\text{ cm}^{-1}$  โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นชั้นของผลึก

E.Gheeraert, N.Casanova [26] สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนโดยวิธี Quartz-tube-type microwave ร่วมกับ Plasma chemical vapor deposition โดยการเจ็อบแบบเย็นด้วยซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส เติมแก๊ส  $[\text{P}]/[\text{C}] = 100\text{-}1500\text{ ppm}$  ตรวจสอบผลโดย FTIR พบว่า ฟิล์มมีการจัดเรียงผลึกที่ พีก 111 และวัตต์อุณหภูมิของฟอสฟอรัส 523, 562 meV พลังงานกระตุ้น 490-550 meV ประมาณ 400 K การโดบแบบ N-type ในฟอสฟอรัสประสบความสำเร็จ ในการโดบซัลเฟอร์พบพีกที่ 100 เติม  $\text{H}_2\text{S}$   $[\text{S}]/[\text{C}] = 500\text{-}5000\text{ ppm}$  ในแก๊สเฟส ทำให้เกิดฟิล์มสี่เทา ฟิล์มที่ได้มีความต้านทานสูง

R.Haubner [20] สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนเจ็อบแบบเย็น เปรียบเทียบผลการเคลือบและสมบัติที่ต่างกันของอะตอม โบรอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์ แบบ Hot-filament บนวัสดุรองรับซิลิคอนชนิดพี(100) โดยนำมาชุบให้เป็นรอยด้วยผงเพชร ในปฏิกิริยาใช้แก๊สไฮโดรเจน 99.999% มีเทน 99.995% วิเคราะห์ความหนาของฟิล์มโดยใช้น้ำหนักของตัวรองรับก่อนและหลังการเคลือบ พบว่า การเจ็อบแบบเย็นของอะตอมของธาตุฟอสฟอรัส อะตอมมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของคาร์บอน อัตราการเจริญเติบโตของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสน้อยลง และการเติมอะตอมฟอสฟอรัสจะมีเงื่อนไยเทียบกับอัตราการเจริญเติบโตของผลึกฟิล์มเพชรที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิของตัวรองรับต่ำ ( $820^\circ\text{C}$ ) ความดันสูง (50-75 Torr) และอุณหภูมิของ filament ( $\sim 2300^\circ\text{C}$ ) การเจ็อบไนโตรเจน จะเกิด HCN หรือ CN ระหว่างการเคลือบซึ่งมีผลทำให้ผิวหน้าของฟิล์มเพชรมีความสม่ำเสมอ การเจ็อบด้วยโบรอน พบว่าที่ผิวหน้าของฟิล์มมีความเข้มข้นที่ผิวหน้าสูง การเจ็อบด้วยซัลเฟอร์ การคำนวณทางไดนามิกส์แสดงปฏิกิริยา  $\text{H}_2\text{S}$  กับมีเทน เกิดเป็น CS ในระหว่างการกระตุ้น ( $>2,000^\circ\text{C}$ ) อุณหภูมิของวัสดุรองรับ ( $>1,000^\circ\text{C}$ ) ปฏิกิริยาจะผันกลับเป็น CS และ  $\text{H}_2\text{S}$  การเกิด  $\text{H}_2\text{S}$  ส่งผลให้เกิดนิวเคลียสของฟิล์มลดลง การเจริญเติบโตของฟิล์มถูกแบ่งบนผิวของซิลิคอน การดูดซับอะตอมของซัลเฟอร์ในฟิล์มคาร์บอนลดลง เนื่องจากอัตราการถ่ายเทที่ผิวลดลง แต่ชั้นของฟิล์มเพชรมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เจ็อบซัลเฟอร์

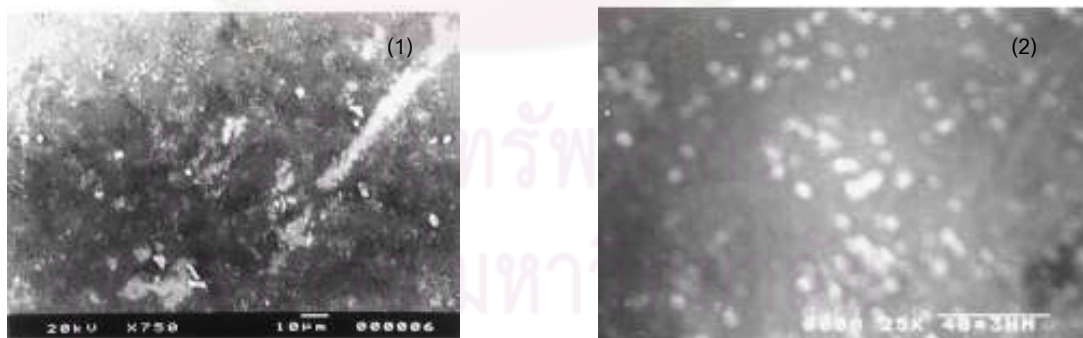
Sharif Mohammad Mominuzzaman [43] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจ็อบฟอสฟอรัสที่ 1,3,5,7 โดยมวล ใช้เทคนิค pulsed laser deposition ใช้เป้า Camphoric carbon (CC) ได้จากการเผา

Camphor ( $C_{10}H_{16}O$ ) จากแหล่งธรรมชาติ ระยะห่างระหว่างเป้าถึงตัวรองรับ 45 mm. บนตัวรองรับ Silicon และ Quartz ศึกษาค่าการนำไฟฟ้าและค่าพลังงานกระตุ้นโดยใช้ electron spin resonance ในการวิเคราะห์ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น ของฟิล์ม DLC มีค่า 0.17 eV และค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัส 1% มีค่า 0.23 eV แต่เมื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสเป็น 7% ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่า 0.12 eV ซึ่งการศึกษาพลังงานกระตุ้นแสดงให้เห็นถึงโอกาสในการพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จาก valence band ไป conduction band และค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มจะแปรตามปริมาณของฟอสฟอรัส พบว่า ฟิล์ม DLC มีค่าการนำไฟฟ้า  $5 \times 10^{-5} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ฟิล์ม DLC ซึ่งเจือฟอสฟอรัส 1% ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะลดลงเหลือ  $2.5 \times 10^{-5} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แต่เมื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสถึง 7% ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

#### 2.4.2.3 การสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยใส่อะตอมสารเจือซัลเฟอร์

จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยจากวารสารทั้งในและต่างประเทศ ทำให้ผู้วิจัยพบว่าการเจือซัลเฟอร์ในฟิล์ม พบแต่เฉพาะการเจือในฟิล์มเพชรเท่านั้น และยังไม่มีการสังเคราะห์ฟิล์มโดยการใช้การเจือซัลเฟอร์ในฟิล์ม DLC ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้รวบรวมข้อมูลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเจือซัลเฟอร์ในระบบต่าง จึงขอยกตัวอย่างพอสังเขปดังนี้

S. Kundoo และคณะ [24] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC แบบชนิดเอ็นเจือซัลเฟอร์ทำในระบบการตกตะกอนแบบอิเล็กโทรลิซิส (electrolysis) เมื่อตรวจลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น (JEOL, JSM 5200) พบว่า ฟิล์ม DLC ที่ไม่มีสารเจือลักษณะพื้นผิวฟิล์มค่อนข้างเรียบ และพบเกรนที่พื้นผิวของฟิล์มที่มีการใส่สารเจือซัลเฟอร์

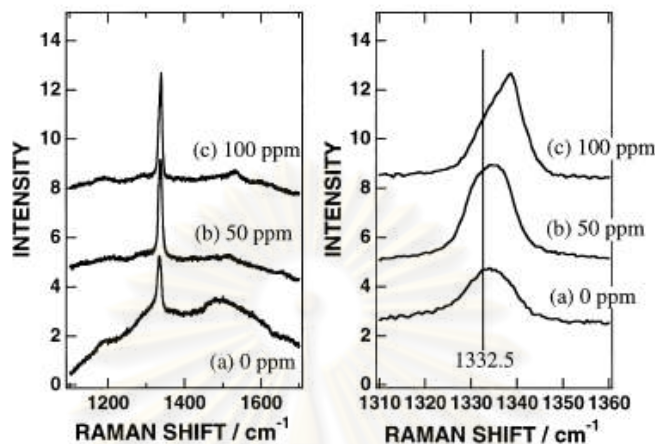


รูปที่ 2.13 (1) แสดงผลลักษณะพื้นผิวหน้าฟิล์ม DLC ที่ไม่ใส่สารเจือ

(2) แสดงผลลักษณะพื้นผิวหน้าฟิล์มที่ใส่สารเจือซัลเฟอร์ [24]

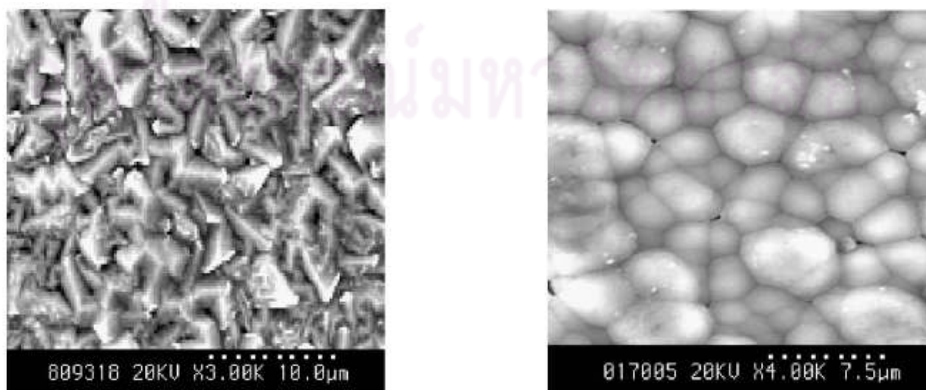
Mikka Nishitani-Gamo และคณะ [28] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์โดยวิธี CVD ในการทดลองใช้แก๊ส  $CH_4/H_2S/H_2$  ในการทำปฏิกิริยาใน quartz reactor บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน

โดยศึกษาปริมาณของ แก๊ส  $H_2S$  10-100 ppm และนำฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มโดยใช้รามานสเปกโทรสโกปี พบว่าการเติมปริมาณแก๊ส  $H_2S$  ในปริมาณเล็กน้อยจะเกิดเฟสผลึก non-diamond ซึ่งจะช่วยให้ปรับปรุงคุณภาพของผลึก และที่ปริมาณแก๊ส  $H_2S$  100 ppm ตำแหน่งพีคจะเลื่อน จาก  $1332.5\text{ cm}^{-1}$  ไปที่  $1339\text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ แก๊ส  $H_2S$  ดังรูปที่ 10



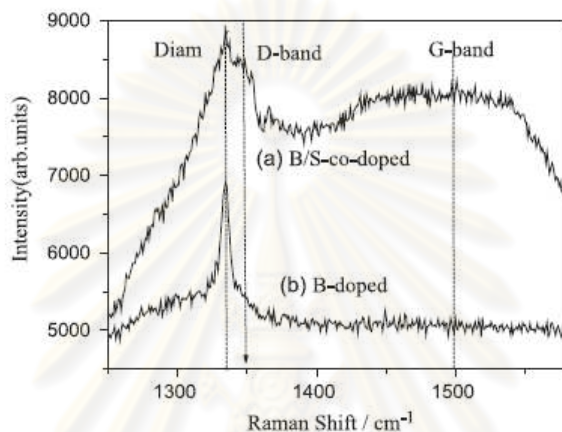
รูปที่ 2.14 รามานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC ที่ปริมาณสารซัลเฟอร์ (a) 0 ppm (b) 50 ppm และ (c) 100 ppm ตามลำดับ [28]

Rongbin Li และคณะ [29] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์และเจือซัลเฟอร์ร่วมกับโบรอน โดยวิธี microwave plasma-assisted CVD (MPCVD) โดยใช้ dimethyl disulfide และ boron dioxide ใน acetone เข้มข้น 0.5% และนำฟิล์มที่ได้มาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วย SEM พบว่าฟิล์มที่ยังไม่ใส่สารเจือมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกอย่างกระจัดกระจาย แต่เมื่อใส่สารเจือซัลเฟอร์พบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำ นอกจากนี้ยังมีรายงานในงานวิจัยของผู้วิจัยอื่นซึ่งพบว่าในฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์และไนโตรเจน ในการสังเคราะห์โดยวิธี CVD มีลักษณะของฟิล์มที่คล้ายกัน



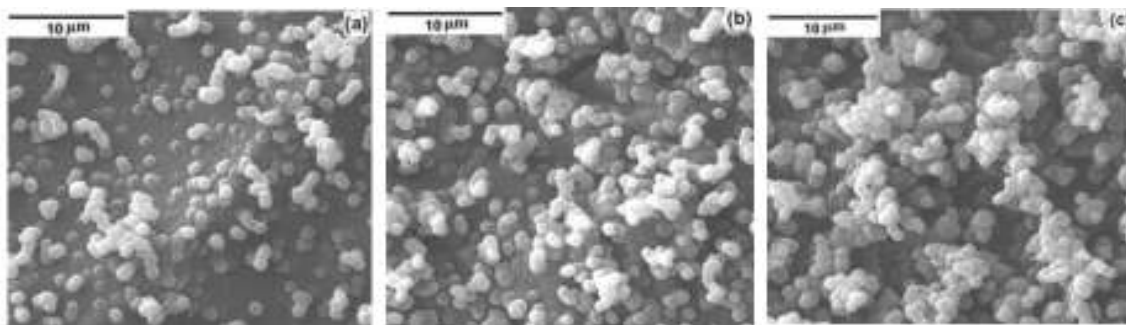
รูปที่ 2.15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC โดย (a)ฟิล์ม DLC ที่ยังไม่ใส่สารเจือ (b) ฟิล์ม DLC ที่ใส่สารเจือซัลเฟอร์ ตามลำดับ [29]

เมื่อศึกษาผลของรามานของฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ร่วมกับโบรอนพบว่าประกอบไปด้วยเฟสผลึกแกรไฟต์ และคาร์บอนอสัณฐาน ( $sp^2$ ) และผลึกเพชร โดยพบพีคที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ประกอบด้วยผลึกแกรไฟต์ขนาดไมโครปริมาณเล็กน้อย และคาร์บอนอสัณฐาน ( $sp^2$ ) โดยพบตำแหน่งพีค D และ G ที่  $1360$  และ  $1500\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ดังกราฟ (a) และจากกราฟ (b) เป็นสเปกตรัมของการเจือโบรอนในฟิล์มเพชร ปรากฏว่าไม่ปรากฏพีคเพชรแสดงว่าการเติมซัลเฟอร์ในระหว่างการเจือในฟิล์มเพชร ทำให้เกิด  $sp^2$  ในเฟสคาร์บอน ซึ่งสอดคล้องกับการเจือไนโตรเจนในฟิล์มเพชรซึ่งทำให้เกิดความเป็นแกรไฟต์ในฟิล์มคาร์บอน



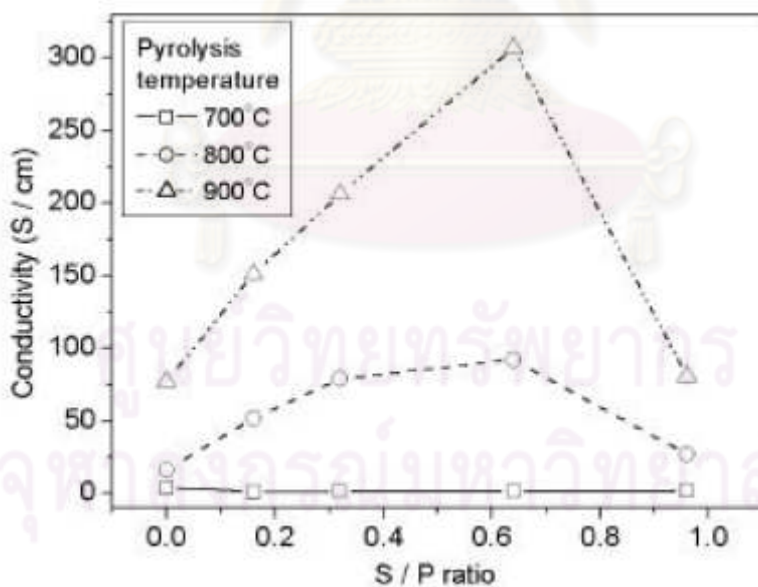
รูปที่ 2.16 รามานสเปกตรัมของฟิล์มเพชร (a) ฟิล์มDLCเจือซัลเฟอร์ร่วมกับโบรอน และ (b) ฟิล์ม DLC ซึ่งเจือโบรอน [29]

Latha kumari and s v subramanyam [30] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์โดยวิธี ไพโรไลซิสของคาร์บอนโดยใช้ precursor maleic anhydride(P)บนวัสดุรองรับควอร์ซในบรรยากาศอาร์กอน ศึกษาผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์  $700-900\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อวิเคราะห์โดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น S-360, LINK pentafet-10000 เพื่อดูลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราส่วน S/P เท่ากับ 0.16, 0.32 และ 0.96 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ S/P ความเข้มข้นของซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของอะตอมซัลเฟอร์จะไม่สม่ำเสมอ มีขนาดเฉลี่ยทรงกลมแกรไฟต์ประมาณ  $0.5-0.7\text{ }\mu\text{m}$  และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้นของ S/P ไม่ได้ทำให้ขนาดของทรงกลมใหญ่ขึ้นแต่จะเกิดการไปรวมตัวกันของแกรไฟต์



รูปที่ 2.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ที่ 900 °C ที่อัตราส่วน S/P เท่ากับ 0.16, 0.32 และ 0.96 [30]

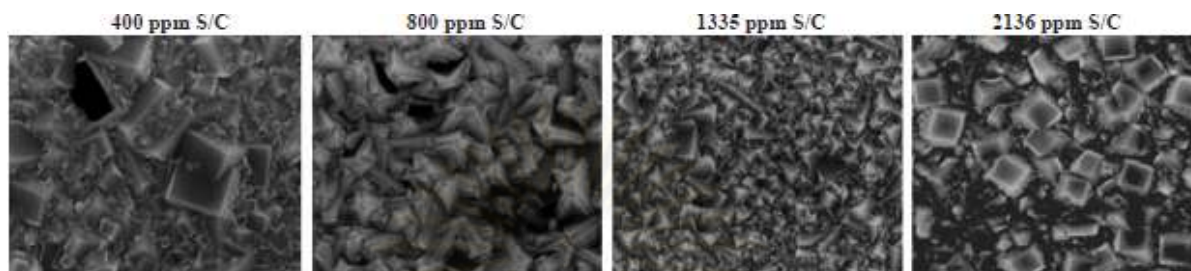
วัดค่าการนำไฟฟ้าโดยวิธี four-probe เมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง 900 °C ค่าสภาพนำไฟฟ้าดีกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 °C และ 800 °C เนื่องจากการนำไฟฟ้าขึ้นกับ carrier concentration และความเป็นผลึก นอกจากนี้สมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มขึ้นกับปริมาณซัลเฟอร์โดยการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ไปจนค่าที่เหมาะสม จากนั้นการนำไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณซัลเฟอร์ที่มากขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอย่างรุนแรง



รูปที่ 2.18 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ 300K กับปริมาณซัลเฟอร์ ที่เตรียมโดยอุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน [30]

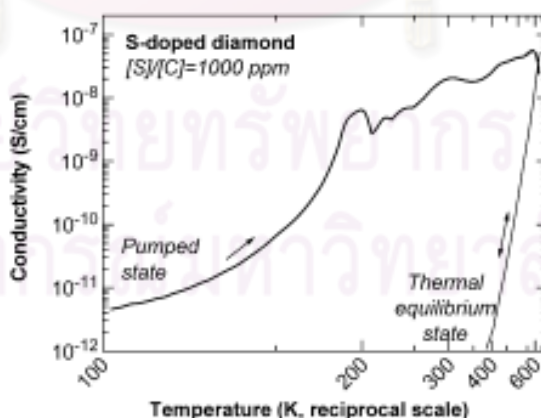
R. Haubner [20] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์ แบบ Hot-filament Si(100) ชนิดที่เป็นวัสดุรองรับ ศึกษาผลของความเข้มข้นตั้งแต่ 400-2136 ppm ของแก๊ส

$H_2S/CH_4$  และพบว่าในระหว่างการสังเคราะห์จะเกิดปฏิกิริยาของ  $H_2S$  กับ  $CH_4$  เกิดเป็น CS แต่เมื่อในระบบมีอุณหภูมิสูงกว่า  $2,000^\circ C$  อุณหภูมิของตัวรองรับสูงกว่า  $1,000^\circ C$  ปฏิกิริยาจะผันกลับส่งผลให้เกิด  $H_2S$  ทำให้นิวเคลียสของฟิล์มลดลง เมื่อวิเคราะห์โดยไมโครรามานปรอทพิคไม่ชัดเจน เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าอัตราการสังเคราะห์ที่สูงกว่าจะแสดงผลึกของเพชรมากกว่า



รูปที่ 2.19 ลักษณะพื้นผิวหน้าฟิล์ม DLC ที่ของความเข้มข้นต่างๆ [20]

E. Gheeraert, N. Casanova [26] สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนโดยวิธีไมโครเวฟ เจือแบบชนิดอื่น โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ในช่วง 500-5000 ppm ที่ใส่ในฟิล์ม DLC กับค่าการนำไฟฟ้าพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 77K ถึง 500 K ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลทางอุณหภูมิที่ 500 K โดยค่าการนำไฟฟ้าจะคล้ายกับฟิล์ม DLC ที่ยังไม่เจือซึ่งมีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1 eV วิเคราะห์ผลโดยรามานพบว่าความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ที่ 1000 ppm มีการจัดเรียงผลึกแบบ 100 ค่าพลังงานกระตุ้นของการนำไฟฟ้า (Activation energy of the conductivity) ประมาณ 360 meV ที่อุณหภูมิ 210 K และ 285K



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของแก๊สซัลเฟอร์ที่ 1000 ppm [26]



ตารางที่ 2.3 สรุปแถบพลังงานของฟิล์ม DLC และฟิล์มเพชร [8]

| ชนิด         | Optical band gap (eV) |
|--------------|-----------------------|
| เพชร         | 5.5                   |
| แกรไฟต์      | 0                     |
| a-C          | 0.5-1.5               |
| a-C:H        | 1.0-2.2               |
| ฟิล์มเพชร    | 1.9-2.6               |
| Evaporated C | 0.4-0.7               |
| Sputtered C  | 0.5                   |
| ta-C         | 2.5                   |
| ta-C:H       | 2-2.5                 |

ตารางที่ 2.4 สรุปค่าสภาพนำไฟฟ้าและแถบพลังงานของฟิล์ม DLC และฟิล์มเพชรโดยสารเจือต่างๆ

| ธาตุ     | สภาพการนำไฟฟ้า ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) <sup>-1</sup> | Mobility ( $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$ ) | Activation energy (eV)                      | Band gap (eV)    | อ้างอิง              |
|----------|---|--|---|------------------|----------------------|
| โบรอน    | -   | 1500   | 0.37 (in diamond)                           | -                | [17]                 |
| ไฮโดรเจน | $2.76 \times 10^{-2}$                                     |  | -   | -                | [31]                 |
| ไนโตรเจน | $2 \times 10^{-15} - 2 \times 10^{-10}$                   | 28@ 500K   |   | 1.7 (in diamond) | [21]                 |
| ฟอสฟอรัส | -   | 10-100   | 0.49-0.60,<br>0.6 (in diamond)<br>0.49-0.55 |                  | [20]<br>[26]<br>[27] |
| ซิลเฟอร์ | $10^{-8} - 10^{-12}$                                      | 597<br>600   | 0.38<br>0.52-0.39<br>0.37                   | 0.8-2.0          | [28]<br>[29]<br>[30] |

## 2.5 รามานสเปกโทรสโกปี [2,33]

### 2.5.1 บทนำ

เทคนิครามานเกิดจากการกระเจิงแสงจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งเกิดจากการสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) ของโมเลกุล ซึ่งเทคนิคนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณของทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์

### 2.5.2 ทฤษฎีและหลักการ

รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ค้นพบจากปรากฏการณ์ที่เกิดจากการชนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับตัวกลางโปร่งแสง ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการกระเจิงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่และเฟสซึ่งเรียกว่า Raman Scattering เกิดขึ้นโดยการใช้อำนาจแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง (laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งใส จะเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) โดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อย โดยเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีการชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) กับโมเลกุลของสารแสงบางส่วนเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทุกทาง เรียกว่าการกระเจิงแบบทินดอลล์ (Tyndall scattering)

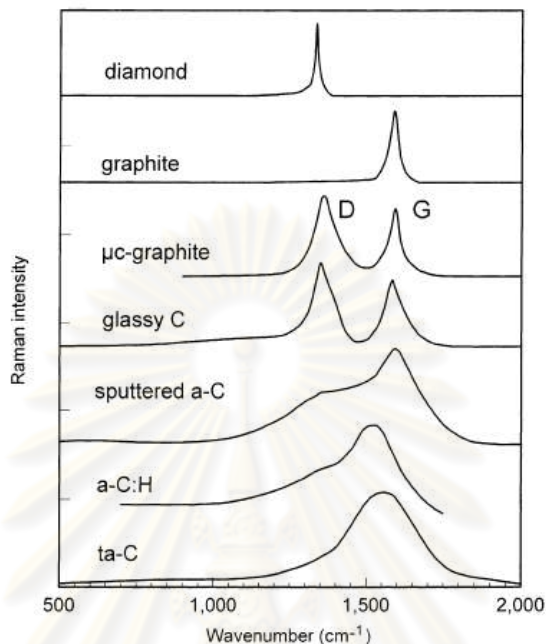
โฟตอนจากแสงเลเซอร์ได้รับพลังงาน  $h\nu_L$  ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารจะเกิดอันตรกิริยาขึ้น โดยมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปทำให้โมเลกุลมีการจัดตัวของอิเล็กตรอนไปสู่สถานะใหม่เรียกว่าสถานะเสมือน (virtual state) พลังงานที่หายไปเท่ากับ  $h\nu_1$  ทำให้ vibrational เปลี่ยนระดับของพลังงานในย่านอินฟราเรดดังนั้นพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงเท่ากับ  $h\nu_L - h\nu_1$  ให้สเปกตรัมออกเป็น stokes line เมื่อโฟตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุลทำให้โฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นนั่นคือเมื่อโฟตอนชนกับโมเลกุลทำให้โมเลกุลสู่สถานะเสมือนสูงขึ้น และเมื่อเกิดการกระเจิงจึงทำให้พลังงานเป็น  $h\nu_L + h\nu_1$  เรียกว่า anti-stokes line สิ่งที่สำคัญในการดูดกลืนแสงหรือโฟตอนเริ่มต้นและการให้อิมพัลส์ของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดอย่างต่อเนื่องและการเกิดอันตรกิริยาขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนในโมเลกุลถูกรบกวนหรือ Distorted ได้ง่ายเพียงใดคุณสมบัตินี้เรียกว่า polarizability ( $\alpha$ ) ถ้า polarizability ของโมเลกุลเปลี่ยนในระหว่างการสั่นของโมเลกุล จะมีผลต่อการเกิด raman shifted ของโฟตอนจากการเกิดอันตรกิริยา เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วนหลัก คือ

1. แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูง
2. ระบบใส่สารตัวอย่าง
3. เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ที่เหมาะสม

### 2.5.3 รามานสเปกโทรสโกปี ของฟิล์ม DLC

รามานคือเทคนิคที่ดีที่สุดที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม DLC โดยสเปกตรัมที่ปรากฏจะมีพีคหลัก 2 พีค คือ พีคที่ตำแหน่ง  $1350 \text{ cm}^{-1}$  (Disordered band หรือ D band) โดยจะเป็นพันธะคาร์บอนแบบ  $sp^2$  และ  $sp^3$  ปะปนกันและมีลักษณะของพีคแหลมคม และอีกพีคจะเป็นพีคของ

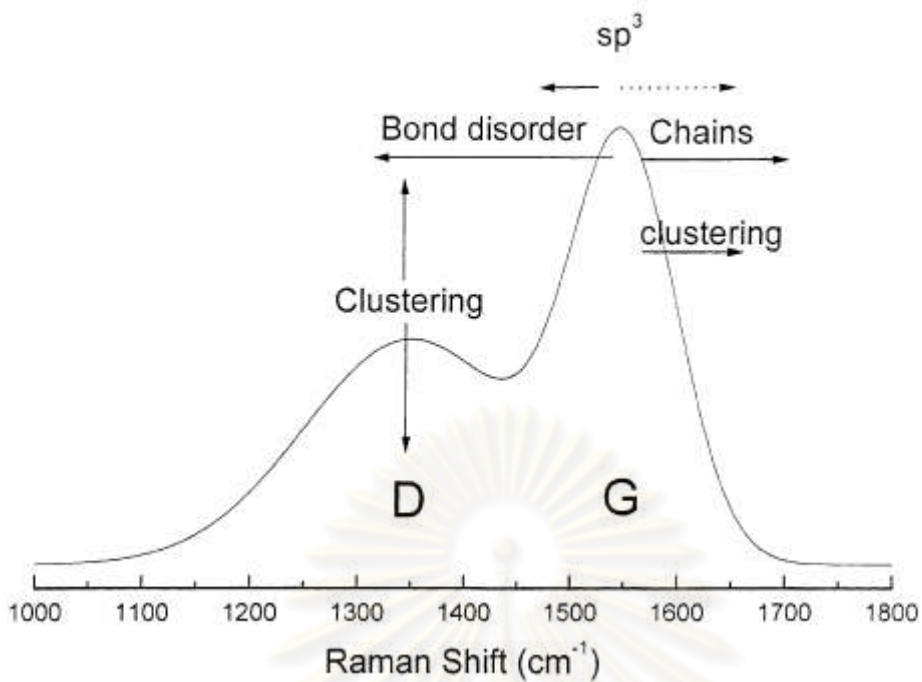
แกรไฟต์ (Graphite band หรือ G band) จะปรากฏที่ตำแหน่ง  $1580\text{ cm}^{-1}$  โดยมีพันธะคาร์บอนเป็นแบบ  $sp^2$  และพีคจะมีลักษณะ โกล่งมน และที่ตำแหน่ง  $1332\text{ cm}^{-1}$  จะมีพีคเดี่ยวที่ซึ่งเป็นแถบของเพชร แสดงดังรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.21 แสดงการเปรียบเทียบรามานของคาร์บอนชนิดต่างๆ



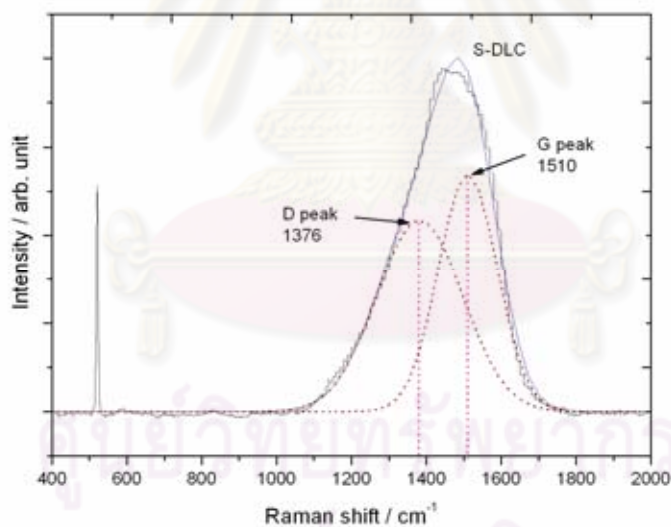
รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบชนิดรามานของคาร์บอนชนิดต่างๆ [2]

Ferrari พบว่าสเปกตรัมของฟิล์ม DLC ขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ เฟสของ  $sp^2$ , ผลึกนาโนแกรไฟต์ ต่อ  $sp^2$  (a-C), อัตราส่วน  $sp^2/sp^3$  ตำแหน่ง ความกว้าง และความเข้มพีค D และ G ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและสมบัติของฟิล์ม ทั้งนี้สเปกตรัมรามานของฟิล์ม DLC ขึ้นอยู่กับพีค D และพีค G แสดงดังรูปที่ 2.17

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 รามานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC แสดงตำแหน่งและความสูงของพีค D และพีคG [2]



รูปที่ 2.23 Deconvolution ของรามานสเปกตรัมของฟิล์ม DLC พืตกภาพโดยใช้ Gaussians

## 2.6 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี [33]

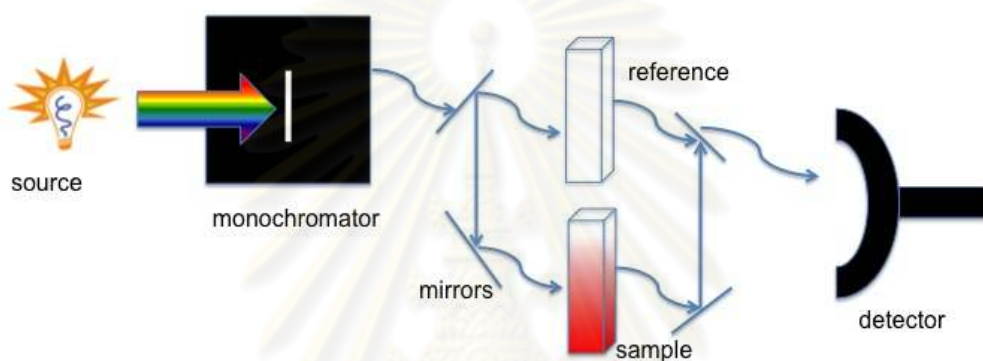
### 2.6.1 บทนำ

ยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่โดยลำแสงหนึ่งผ่านสารละลายตัวอย่าง และอีกลำแสงหนึ่งผ่าน blank และร่วมกับระบบ dynamic feedback เครื่องที่ใช้จะมีประสิทธิภาพดี

ขึ้น คือ สามารถวัดได้เร็ว ถูกต้อง แม่นยำ โดยยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สามารถวัดได้ทั้งการสะท้อน การส่องผ่าน และการดูดกลืนของแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ในช่วงความยาวคลื่น 190-800 นาโนเมตร ประโยชน์ของการใช้ยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ในการวิเคราะห์ฟิล์มบางคือ สามารถหาแถบพลังงานของฟิล์ม (optical band gap) ได้

### 2.6.2 ทฤษฎีและหลักการ

เมื่อให้ลำแสงเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัสดุที่ใส พบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุผ่านออกไป ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านปริซึมสเปกตรัม บางส่วนจะหายไป



รูปที่ 2.24 หลักการวัดแบบ double beam

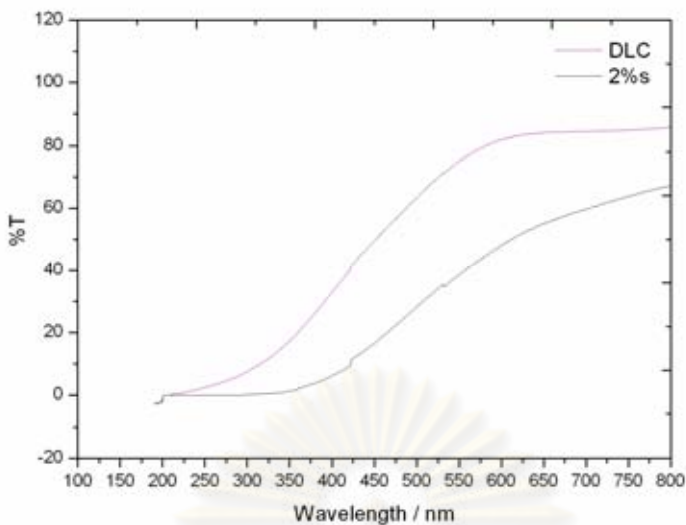
### 2.6.3 การหาค่า Band gap

UV-VIS spectroscopy วัดโดยใน mode transmission และคำนวณหาแถบพลังงานโดยใช้ Tauc equation[34].

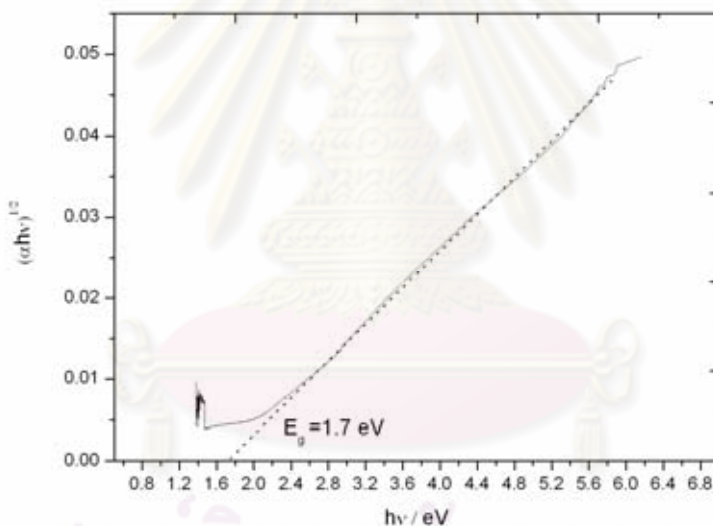
$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(E_g - h\nu) \quad (2)$$

โดย  $E_g$  คือ optical band gap ,  $B$  คือ density of the localized state (tauc gap constant) และ  $h\nu$  คือ photon energy. โดยค่า  $E_g$  สามารถหาได้จากการลากเส้นผ่านกราฟไปยังแกน x แสดงดังรูปที่ 2.26 พล็อตระหว่าง  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  กับ  $h\nu$

โดยฟิล์มที่นำมาวิเคราะห์สังเคราะห์บนควอร์ซ ขนาด 15mm x15 mm วัดการส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 190-900 nm แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างสเปกตรัมการส่องผ่านฟิล์ม DLC



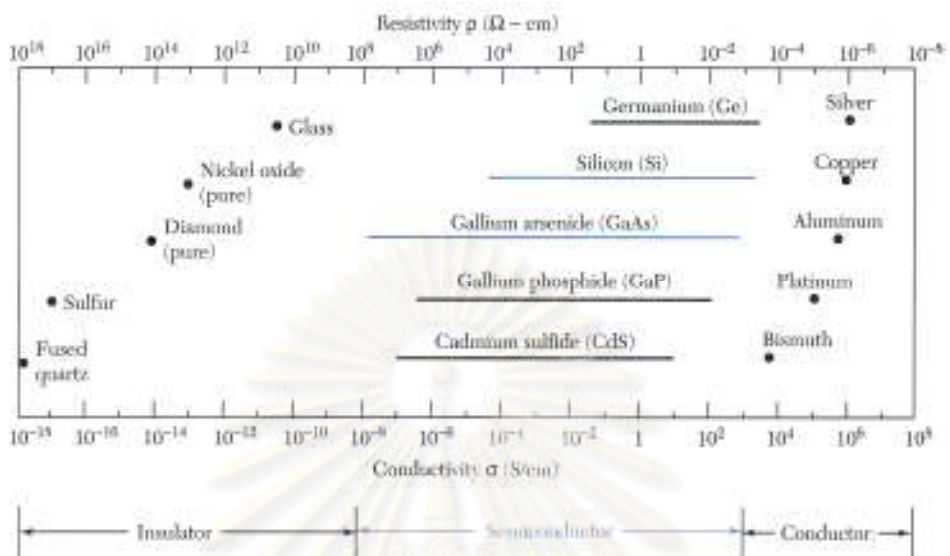
รูปที่ 2.26 ตัวอย่างฟิล์ม DLC พล็อตโดยใช้สมการ Tauc

2.7 วัดค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม [35,36]

2.7.1 บทนำ

การวัดสภาพการต้านทานไฟฟ้าเป็นพื้นฐานที่สำคัญ โดยสมบัติของแข็งสามารถแบ่งกลุ่มได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าเรียกว่าฉนวนเช่น กระฉก quartz มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ต่ำในช่วง  $10^{-18} - 10^{-8} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีเรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า เช่น อลูมิเนียม และ

เงิน มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าในช่วง  $10^4 - 10^6 (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ส่วนวัสดุที่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างโลหะและฉนวนเรียกว่าสารกึ่งตัวนำมีค่าในช่วง  $10^{-8} - 10^3 (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ช่วงของสภาพนำไฟฟ้า ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ โลหะ [36]

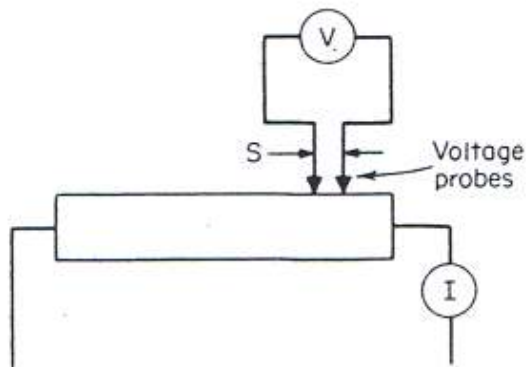
### 2.7.2 ทฤษฎีและหลักการวัดฟิล์มด้วยเทคนิค two-probe

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ ถูกกำหนดจากความเป็นระเบียบในผลึกของฟิล์มและความบกพร่องในรูปแบบต่างๆในระหว่างการสังเคราะห์ฟิล์มหลักการวัดฟิล์มด้วยเทคนิค Two point probe เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าในปริมาณน้อยที่สุดเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งของตัวอย่างและปล่อยให้กระแสไหลออกที่ปลายอีกด้านหนึ่งในขณะเดียวกันก็จ่ายความต่างศักย์ไปพร้อมๆกัน แสดงดังรูปที่ 2.28 และนำค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานดังสมการ

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{3}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{4}$$

เมื่อ  $\rho$  คือค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega\text{-m}$ ),  $R$  คือความต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ ),  $A$  คือพื้นที่ภาคตัดขวาง หรือ ความกว้าง x ความหนา และ  $L$  คือความยาวระหว่างอิเล็กโทรด (0.5 cm) โดยค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเป็นส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ )



รูปที่ 2.28 การวัดความต้านทานไฟฟ้าชนิด 2 ขั้ว [36]

โดยระยะห่างระหว่างจุดที่ต้องการวัดความต่างศักย์จะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสมีค่าสัดส่วน ( $I/A$ ) มากกว่า 3 เท่า เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของสารเจือปนกับพาหะส่วนน้อย (minority carriers) มีผลทำให้ฟิล์มมีค่าความต้านทานจำเพาะที่สูงกว่าความเป็นจริง ขึ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบต้องมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน

## 2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[33,39]

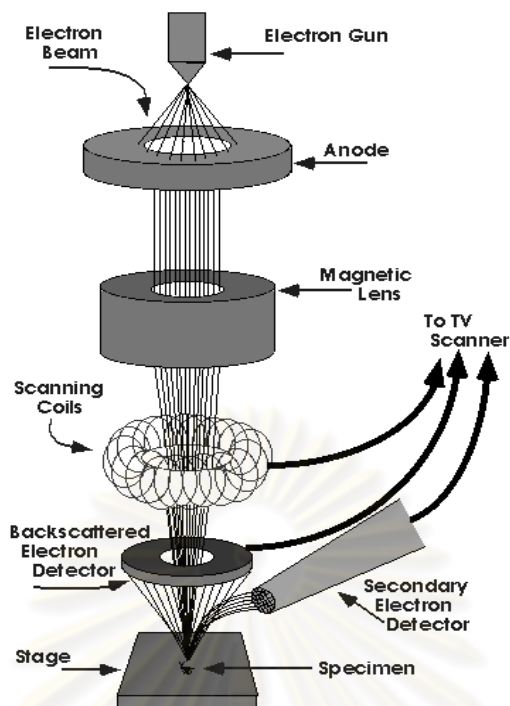
### 2.8.1 บทนำ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEM) ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของฟิล์ม นอกจากนี้ยังอาจต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ

### 2.8.2 ทฤษฎีและหลักการ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อาศัยการใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดลงบนผิวของฟิล์มมีหลักการทำงานโดย ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์สูงจะถูกเร่งและผ่านออกมาตามท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic coils) 4 ชุดโดยขดลวดแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของ sample ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านอยู่รอบๆ sample จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สาม ภาพจะเกิดขึ้นโดยโฟกัสภาพไปยังจอรับภาพและขดลวดสนามแม่เหล็กชุดสุดท้ายที่ได้สามารถบันทึกลงบนเพลทแผ่นฟิล์มหรือแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้แสดงดังรูปที่ 2.29 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด





รูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [33]

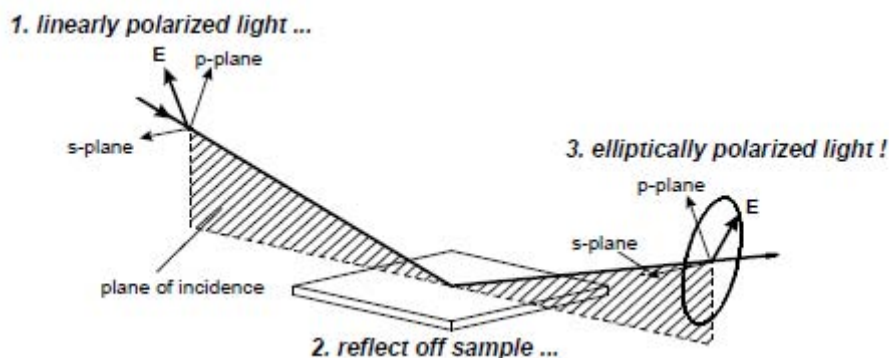
## 2.9 สเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี [40,41]

### 2.9.1 บทนำ

เทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ หาคำความหนาของฟิล์ม ความขรุขระ และสมบัติทางแสง เนื่องจากการตรวจสอบโดยไม่ทำลายชิ้นงาน วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง [40]

### 2.9.2 ทฤษฎีและหลักการวัดฟิล์ม

หลักการวัดโดยวิธีนี้อาศัยหลักการนำคลื่นแสงโพลาไรซ์แบบเส้นตรงที่ตกกระทบเป็นลงบนชิ้นงานเมื่อหลังจากการตกกระทบจะเกิดคลื่นแสงซึ่งมี 2 ทิศทาง คือ คลื่นพี เป็นคลื่นตกกระทบแบบขนาน (parallel polarized) มีทิศของสนามไฟฟ้าขนานกับผิวรอยต่อระหว่างอากาศกับสารกึ่งตัวนำ และคลื่นเอส เป็นคลื่นที่มีโพลาไรซ์ตั้งฉาก ทั้งนี้โดยคลื่นที่สะท้อนออกมาจากชิ้นงานมีโพลาไรซ์เซชันที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาในลักษณะที่เรียกว่าโพลาไรเซชันแบบวงรี แสดงดังรูปที่ 2.30 การเกิดโพลาไรซ์แบบวงรีแบบสะท้อนกับชิ้นงาน ซึ่งในการทดลองเราสามารถเก็บข้อมูลที่มีมุม  $70^\circ$  ของแสงตกกระทบลงบนระนาบผลึก



รูปที่ 2.30 การเกิดโพลาไรซ์แบบวงรีแบบสะท้อนกับชิ้นงาน [40]

จากหลักการของเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี ที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับวัสดุ โดยสนใจผลการตอบสนองที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวของชิ้นงาน จึงทำให้ค่าคงที่การสะท้อนเป็นไปตามกฎของเฟรสเนล (Fresnel's law) และคลื่นตกกระทบตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) กำหนดให้  $r_p$  และ  $r_s$  คือค่า reflectance ของคลื่นพีและคลื่นเอส ตามลำดับ และ ตัวแปร  $\Psi$  และ  $\Delta$  เป็นปริมาณที่เราวัดได้จากเครื่องมือ ซึ่งสัมพันธ์ตามสมการสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี (Ellipsometry equation) [40]

$$\tan(\Psi) \cdot e^{i\Delta} = \rho = \frac{r_p}{r_s} \quad (5)$$

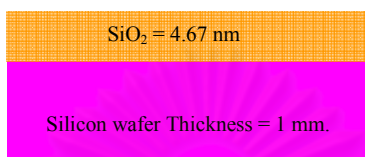
จากเครื่องมือสามารถหาค่า  $n$  และ  $k$  ของแต่ละพลังงานโฟตอน โดย  $N = n + ik$  กำหนดให้  $N$  คือค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวกลางสารกึ่งตัวนำ (complex refractive index)  $n$  คือส่วนจริงของดัชนีหักเหของตัวกลาง และ  $k$  คือส่วนจินตภาพของดัชนีหักเห (extinction coefficient) และสามารถหาค่า Energy band gap ( $E_g$ ) โดยการพล็อตกราฟระหว่างพลังงานโฟตอน ( $E$ ) และ  $E\varepsilon_i^{1/2}$  โดย  $\varepsilon_i = 2nk$  และ  $B$  คือค่าคงที่ที่ได้จากการพล็อตกราฟ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ[40]

$$\varepsilon_i(E) = \frac{B(E - E_g)^2}{E^2} \quad (6)$$

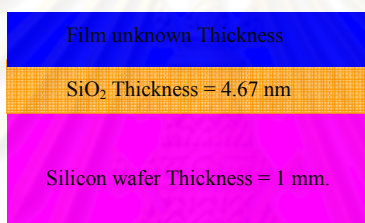
### 2.9.3 การฟิตโมเดล

จากข้อมูลที่ได้จากเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี ไม่สามารถฟิตได้โดยตรง ดังนั้นเราสามารถประมาณได้จากโปรแกรม โดยขั้นตอนในการหาประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 เราวัดค่าความหนาซิลิคอนเวเฟอร์ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 1 mm และให้เครื่องหาความหนาของ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งเท่ากับ 4.67 nm แสดงดังรูปที่ 2.31 เพื่อใช้เป็นค่าที่จะฟิตในการหาความหนาของฟิล์ม

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าความหนาของชั้นฟิล์ม โดยใส่ค่าจากขั้นตอนที่ 1 จากนั้นให้เครื่องวัดหาความหนาของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.32 จากขั้นตอนนี้เราจะทราบความหนาของฟิล์มและค่าความขรุขระ จากขั้นตอนนี้เราจึงค่อยๆปรับโมเดล เพื่อหาค่าแถบพลังงานจากโปรแกรมในเครื่องเราพบว่าโมเดล Tauc-Lorentz (TL) เป็นโมเดลที่เหมาะสมกับฟิล์มในการทดลองนี้โดยให้กราฟที่ฟิตมากที่สุด และโมเดล Tauc-Lorentz (TL) เหมาะกับฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ



รูปที่ 2.31 หาค่าความหนาของชั้น SiO<sub>2</sub> บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน



รูปที่ 2.32 หาค่าความหนาของชั้นฟิล์มบนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC และการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ภายใต้ภาวะการสังเคราะห์ต่างๆ และในส่วนที่ 2 วิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม DLC ที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รามานสเปกโทรสโกปี วัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีและสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี

#### 3.1 ระบบสเปตเตอริง[34]

ระบบสเปตเตอริงที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นระบบที่สร้างขึ้นโดยนาย ณัฐพร พรหมรส ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดของระบบโดยสังเขปดังต่อไปนี้

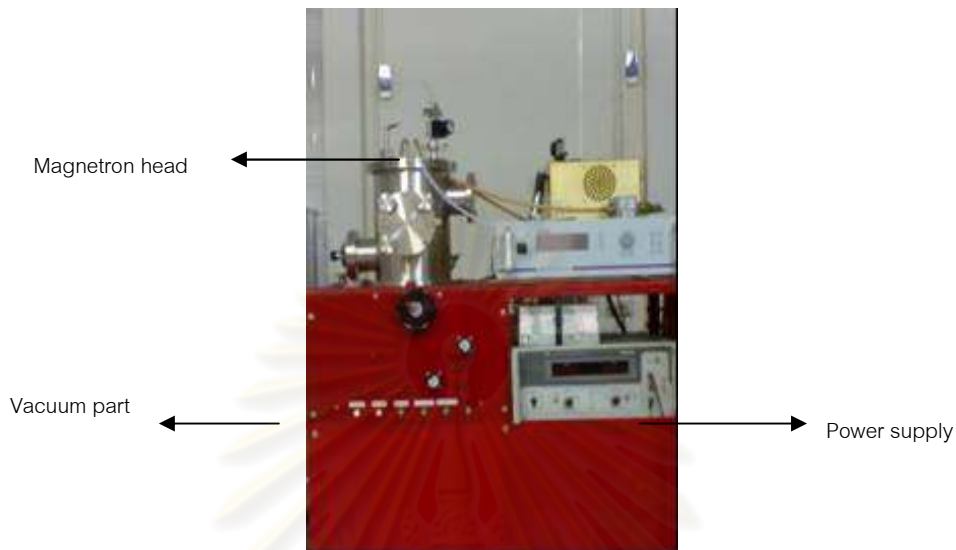
ระบบ DC magnetron sputtering ที่ใช้ในการทดลองนี้มีส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้

1. ส่วนสุญญากาศ (Vacuum chamber) ประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) โดยปั๊มสุญญากาศที่ทำงานร่วมกันในงานวิจัยมี 2 ตัว คือ ปั๊มฟุ้งกระจาย (Diffusion pump) Model 203B No.5298 ของบริษัท Edwards โดยได้ใช้ขดลวดทำความร้อนขึ้นมาใหม่ที่ความต่างศักย์ 220 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้า 250วัตต์ ใช้น้ำมันรุ่น DC704EU ของบริษัท Provac และปั๊มกลโรตารี (Rotary pump)เบอร์ 8 two state ของบริษัท Edwards ที่ความเร็วปั๊ม 8.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

2. ส่วนจ่ายพลังงาน (Power transfer part) ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงยี่ห้อ Good will Model GPR-60H15 สามารถปรับความต่างศักย์ให้คงที่ได้ตั้งแต่ 0-600 โวลต์ และจัดกระแสตั้งแต่ 0-1.5 แอมแปร์

3. หัวแมกนีตรอน (Magnetron head) เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะประสิทธิภาพของหัวแมกนีตรอนมีผลต่อคุณภาพและลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม โดยแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นแม่เหล็กนีโอไดเมียมมี 2ตัวคือแม่เหล็กตัวในมีรูปร่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีความหนา 10 มิลลิเมตร มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิว 536 มิลลิเทสลา และแม่เหล็กตัวนอกมีรูปร่างเป็นวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 30 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 50 มิลลิเมตร มีความหนา 10 มิลลิเมตร มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิว 430

มิลลิเทสลา โดยจะวางแม่เหล็กทั้งสองสลับขั้วกันเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตัวที่ 2 และกักเก็บอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมที่หน้าผิวเป้าแสดงดังรูปที่ 3.1 ภาพถ่ายของระบบ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2 การเตรียมเป้าในการสังเคราะห์

ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ต้องมีการเตรียมเป้าผสมซัลเฟอร์กับแกรไฟต์จากการผสมผงซัลเฟอร์กับแกรไฟต์ที่จำนวนร้อยละของโมลาร์ของซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน เช่น 0%, 2%, 5%, 8% และ 10% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ขัดโดยใช้เครื่องขัดไฮโดรลิกที่ความดัน 1800 psi ผสมกับการเวลาเท็กและนำไปขึ้นรูปกับเครื่องอัดดังรูปที่ 3.2 และนำเป้าที่ได้มาอบที่อุณหภูมิมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ทำความสะอาดผิวหน้าเป้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด



รูปที่ 3.2 เครื่องขัดไฮโดรลิก และเป้าที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3 การสังเคราะห์ฟิล์ม DLC

#### 3.3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ในขั้นตอนการเตรียมแผ่นวัสดุรองรับจะตัดเวเฟอร์ซิลิคอนขนาด  $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$  แล้วทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน อะซิโตน เอทานอล และน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิก ตามลำดับเป็นเวลานาน 20 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนแล้วนำไปใส่ไว้บนแท่งวางวัสดุรองรับ ภายในภาชนะสุญญากาศ เปิดปั๊มกลโรตารี (Rotary pump) เพื่อปั๊มเอาอากาศภายในภาชนะสุญญากาศออก จนกระทั่งได้ความดันในระดับ  $2.0 \times 10^{-2} \text{ torr}$  เปิดน้ำระบายความร้อนให้กับปั๊มไอฟุ้งกระจายจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนเพื่อต้มน้ำมัน และปิดวาล์วหยาบเปิดวาล์วหลังเพื่อสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านทางปั๊มไอฟุ้งกระจาย เปิดปลั๊กวาล์วเพื่อสูบอากาศออกจากภาชนะด้วยการทำงานร่วมกันของปั๊มกลโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายจนได้ความดันระดับ  $2.0 \times 10^{-5} \text{ torr}$  หลังจากนั้นใส่แก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ เพื่อให้เกิดภาวะอิมพัลส์ในภาวะสุญญากาศควบคุมอัตราการไหลของแก๊สด้วยเครื่องควบคุมแก๊สโดยมวล เปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับระบบโดยมีค่า 400-500 V และสังเกตการโกลด์ดิสชาร์จที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการโกลด์ดิสชาร์จขึ้นปรับวาล์วหลังให้อัตราการปั๊มสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊ส เพื่อให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะปั๊มแก๊สอาร์กอนมีค่าคงที่ เมื่อควบคุมเงื่อนไขได้ตามต้องการแล้วทำการสปัตเตอริงเป็นเวลาตามต้องการ

เมื่อทำการสปัตเตอริงครบตามเวลาที่ต้องการ ปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปิดระบบปั๊มแก๊ส หยุดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย ปิดปลั๊กวาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ และปิดปั๊มกลโรตารีหลังจากขดลวดความร้อนเย็นลง

#### 3.3.2 ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคสปัตเตอริง

เนื่องจากข้อจำกัดของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่สร้างขึ้น ได้ถูกใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่สามารถในการทำงานในช่วง ความดัน  $4.0 \times 10^{-3} - 8.0 \times 10^{-2} \text{ torr}$  และความต่างศักย์ที่ 400 – 500 V อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 2 sccm ระยะเวลาในการสปัตเตอริง 30 -75 นาที ระยะห่างระหว่างเป้าถึงตัวรองรับ 5 cm และอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ตั้งแต่ 0-10% ซัลเฟอร์

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์

#### 1. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope : SEM)ของยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6480LV โดยใช้แรงดันไฟฟ้า กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 10,000 30,000 และ 50,000 เท่า



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6480LV ณ ฝ่ายบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางเคมี

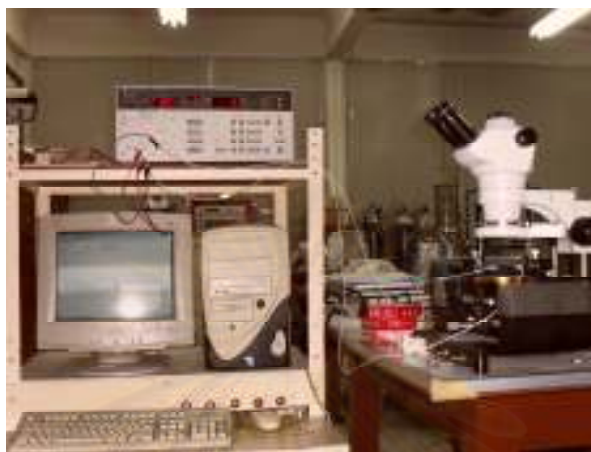
รามานสเปกโทรสโกปี(Raman spectroscopy) ยี่ห้อ Thermo Scientific /USA เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างฟิล์ม DLC



รูปที่ 3.4 รามานสเปกโทรสโกปี ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น DXR SmartRaman Spectrometer ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาและเทคโนโลยีวัสดุขั้นสูงคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

วัดค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม รุ่น 4140B pA meter/DC voltage source



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาและเทคโนโลยีวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

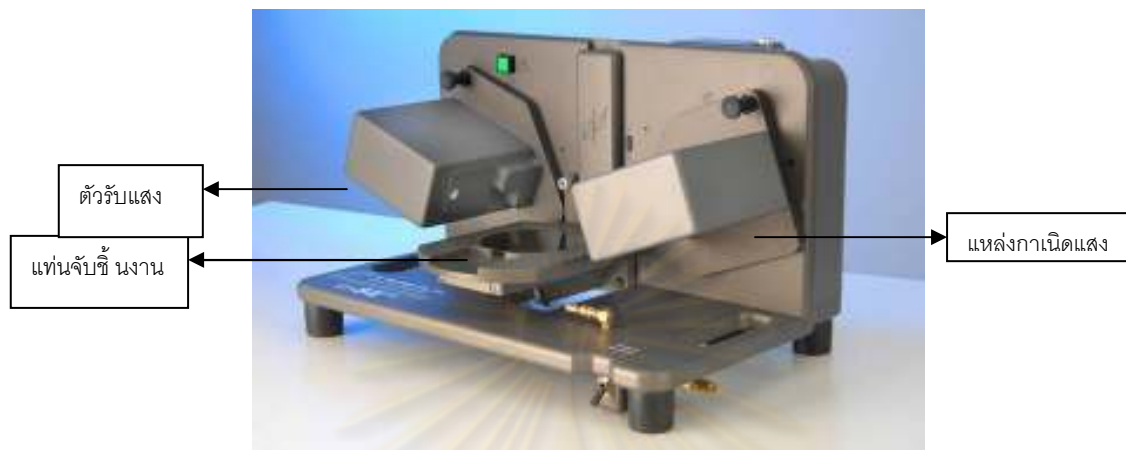
4.1 ยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์(UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ PG Instruments รุ่น T90+ โดยใช้ความยาวคลื่น 190-800 นาโนเมตร



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo รุ่น T90+UV/VIS ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาและเทคโนโลยีวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



4.2 สเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี (spectroscopic ellipsometry) ของบริษัท เจ.เอ.วูลแลม ใช้ซอฟต์แวร์ Complete EASE ในการตรวจวิเคราะห์ สำหรับส่วนประกอบหลักจะมีอยู่ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดแสง (light source) และตัวรับแสง (detector) และแท่นปรับตำแหน่งของชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบหลักเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี ห้องเครื่องมือกลาง ภาควิชาฟิสิกส์ และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

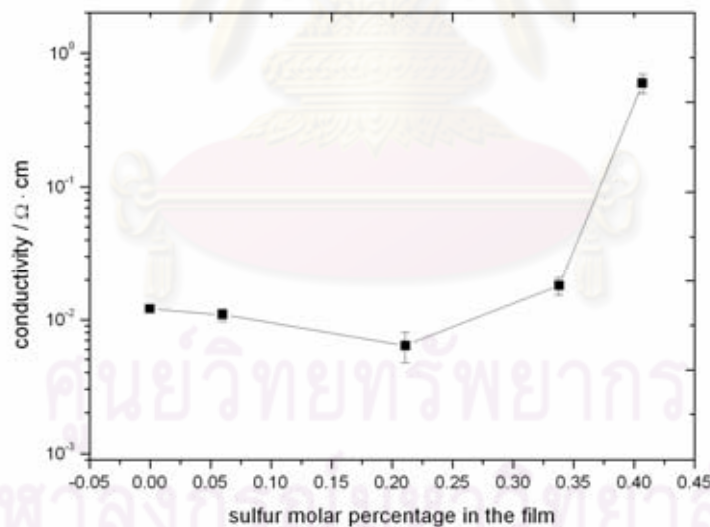
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากเทคนิคของเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆในบทที่ 3 ในบทนี้จะเสนอผลการวิเคราะห์โดยศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ทางกายภาพ ทางโครงสร้าง และทางแสง ของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม, ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และเวลา

#### 4.1 สมบัติทางไฟฟ้า

##### 4.1.1 ผลของอัตราส่วนของคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ที่ใช้เป็นเป้าต่อลักษณะสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC

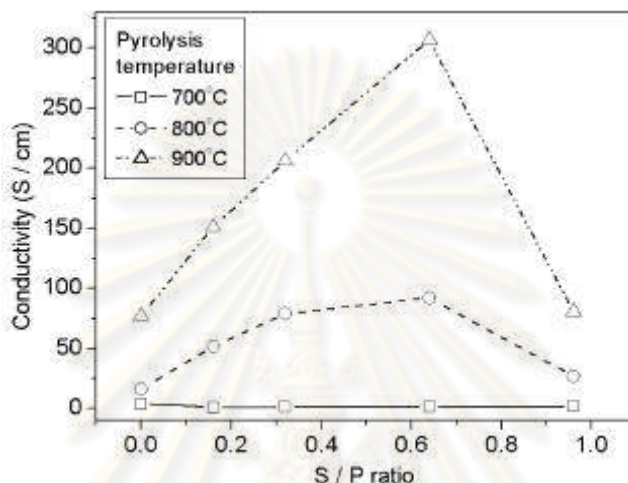
ในการทดลองศึกษาผลของสภาพนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ ที่ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V บนตัวรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน พบว่าเมื่อฟิล์ม DLC มีค่าสภาพนำไฟฟ้า  $1.21 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แต่เมื่อเจือปริมาณซัลเฟอร์ 0.21% ในฟิล์ม กลับพบว่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าลดลงจนถึง  $6.39 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ไปจนถึง 0.41% ในฟิล์ม กลับพบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง  $5.95 \times 10^{-1} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม ต่อค่าสภาพนำไฟฟ้า

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Latha Kumari และ S V Subramanyam [29] สังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอน-ซัลเฟอร์คอมโพสิต โดยวิธี vapour phase pyrolysis ของ maleic anhydride และซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส  $700^{\circ}\text{C}$ ,  $800^{\circ}\text{C}$  และ  $900^{\circ}\text{C}$  พบว่าสมบัติสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มขึ้นอยู่กับอุณหภูมิไพโรไลซิสและปริมาณซัลเฟอร์ โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ไปจนค่าที่

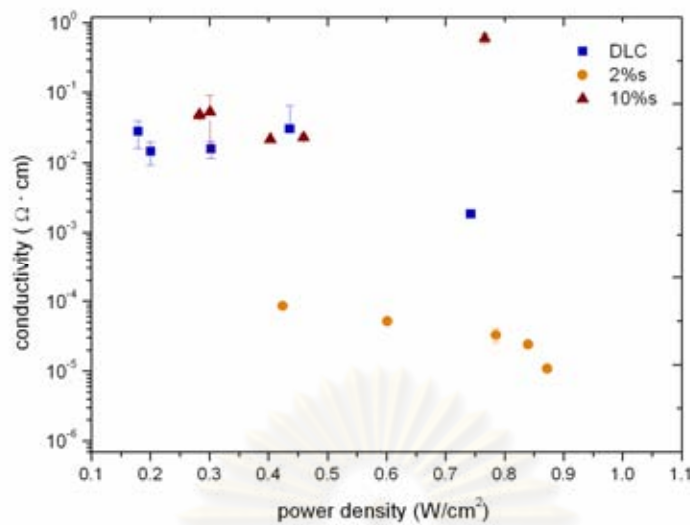
เหมาะสม จากนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น ค่าสภาพนำไฟฟ้าโดยรวมเกิดจากการกระโดดหรือ tunnelling ของประจุพาหะระหว่างสภาพนำไฟฟ้า โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าขึ้นกับความเข้มข้นของพาหะและความเป็นผลึก การที่มีสภาพนำไฟฟ้าน้อยเนื่องมาจากฮออลล์โมบิลิตีต่ำเกิดจากข้อบกพร่องของผลึกและเกิดเกรน boundary โดยการเติมซัลเฟอร์ที่ความเข้มข้นของพาหะต่ำเกิดจากการไอออนในเซชันของอะตอมซัลเฟอร์ที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.2 สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700°C 800°C และ 900°C [29]

#### 4.1.2 สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

จากการศึกษาผลจากการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 400- 500 V ที่อัตราส่วนซัลเฟอร์ 0, 0.06 และ 0.41% ในฟิล์ม พบว่าฟิล์ม DLC ให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในช่วง  $1.84 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $1.46 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  และ 0.41% ซัลเฟอร์ในฟิล์ม ให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในช่วง  $5.21 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $5.95 \times 10^{-1} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ที่อัตราส่วนซัลเฟอร์ 0.41% ในฟิล์ม ให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าเจือซัลเฟอร์ในปริมาณ 0 และ 0.06 % ในฟิล์ม ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ากลับให้แนวโน้มที่ลดลงคือมีค่าในช่วง  $1.01 \times 10^{-1} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $1.09 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ทั้งนี้การที่ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของพาหะเพิ่มขึ้นในปริมาณที่เหมาะสม ค่าสภาพนำไฟฟ้าโดยรวมเกิดจากการกระโดดของประจุพาหะ จึงทำให้มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ 0 และ 0.06% ซัลเฟอร์ในฟิล์ม กลับให้แนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองมีปริมาณของอะตอมในฟิล์มลดลงเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ส่งผลให้มีความเข้มข้นของพาหะต่ำลงจึงทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลง [29]

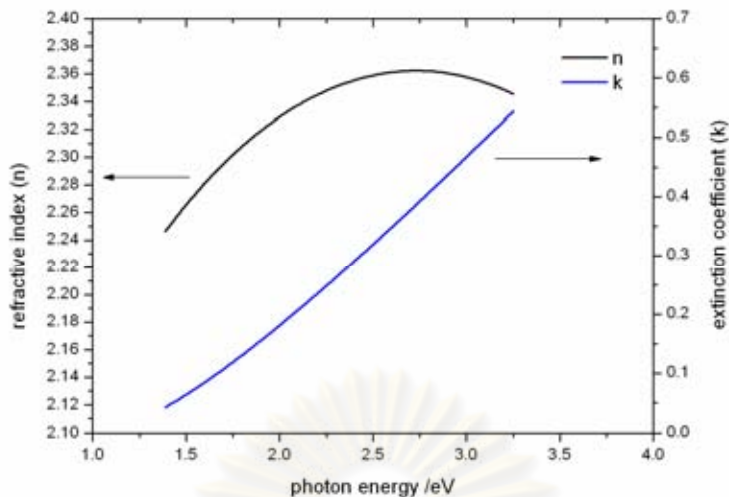


รูปที่ 4.3 พิล์ม DLC และ พิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม  
ต่อค่าสภาพนำไฟฟ้า

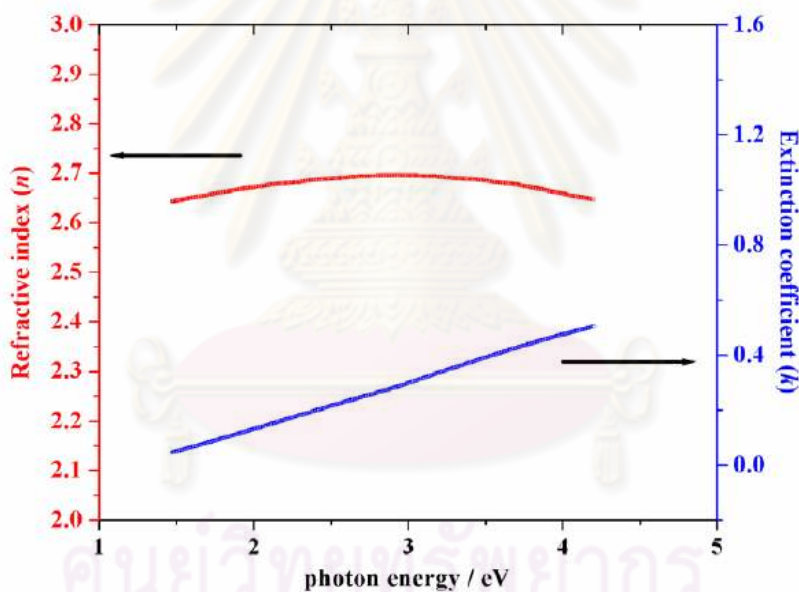
## 4.2 สมบัติทางแสง

### 4.2.1 ดัชนีหักเหของการสะท้อนแสง (Refractive Index) และการดูดกลืนแสง (Extinction Coefficient)

ดัชนีหักเหของการสะท้อนแสง ( $n$ ) และการดูดกลืนแสง ( $k$ ) สามารถวัดโดยสเปกโตรสโคปอิลลิปโซเมทรี แสดงดังรูปที่ 4.4 ตัวอย่างของค่า  $n$  และ  $k$  ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามพลังงานโฟตอน  $1-3.5$  eV แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่า  $n$  มีค่าในช่วง  $2.24-2.34$  และมีค่า  $k$  ในช่วง  $0.04 - 0.54$  โดยค่า  $k$  เพิ่มมากขึ้นเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มมากขึ้น และค่า  $n$  พบว่าในช่วงแรกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อพลังงานโฟตอน  $1-2.5$  eV และจะมีค่าลดลงเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K.Honglertkongsakul [32] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซิลเฟอร์ โดยวิธี pulsed laser ablation ArF ที่  $193$  nm บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่ามีค่า  $n$  ในช่วง  $2.0-3.0$  และค่า  $k$  ในช่วง  $0-0.6$  และทั้งนี้ในงานวิจัยอื่นให้ผลการทดลองค่า  $n$  อยู่ในช่วง  $2.5-2.8$  และค่า  $k$  อยู่ในช่วง  $0-0.5$  โดยฟิล์ม DLC มีสมบัติพิเศษทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มที่มีปริมาณของ  $sp^3$  มากกว่า 95% จะให้สมบัติที่คล้ายเพชร [32] แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างของค่า  $n$  และ  $k$  ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร 0.06% ในฟิล์ม

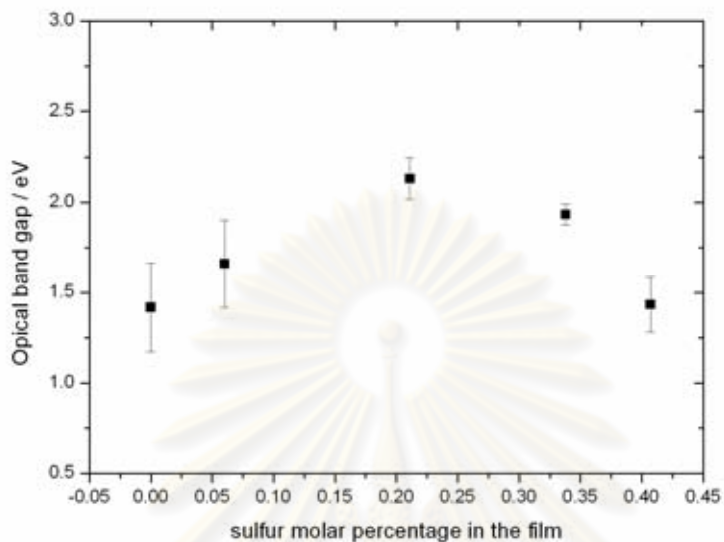


รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของค่า  $n$  และ  $k$  ของฟิล์ม DLC โดยวิธี pulsed laser ablation ArF ที่ 193 nm บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน [32]

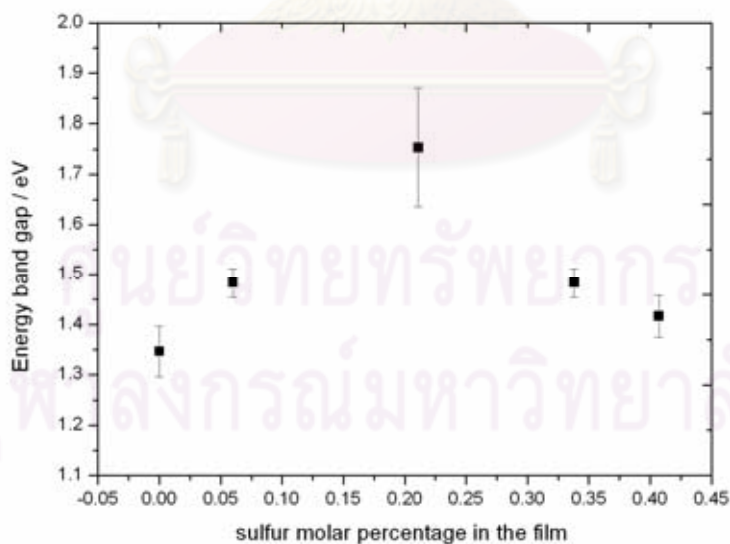
#### 4.2.2 แถบพลังงานของฟิล์มDLC เจือซิลเฟอร 0-10%

จากหัวข้อที่ 2.6 และหัวข้อที่ 2.9 ได้แสดงวิธีการหาค่าแถบพลังงานซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพลังงานฟotonของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร 0-0.41% ในฟิล์ม โดยใช้สเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรีและยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีเนื่องจากแถบพลังงานของฟิล์ม DLC มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างภายในฟิล์ม โดยทั่วไปเพชรมี indirect แถบพลังงานกว้างโดยมีค่า 5.5 eV ในขณะที่เดียวกันแกรไฟต์ไม่มีแถบพลังงาน จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าแถบพลังงานซึ่งได้จากการวิเคราะห์โดย

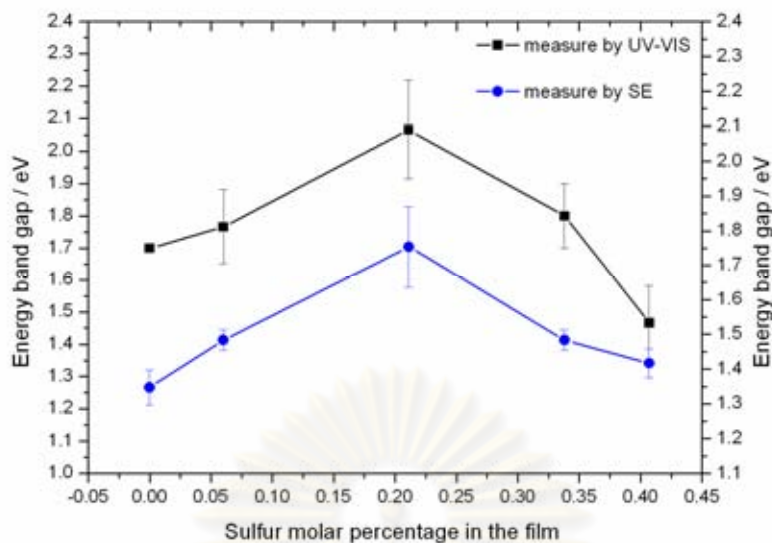
ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม มีค่าแถบพลังงานในช่วง 1.4-2.2 eV ทั้งนี้แถบพลังงานขึ้นอยู่กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม



รูปที่ 4.6 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

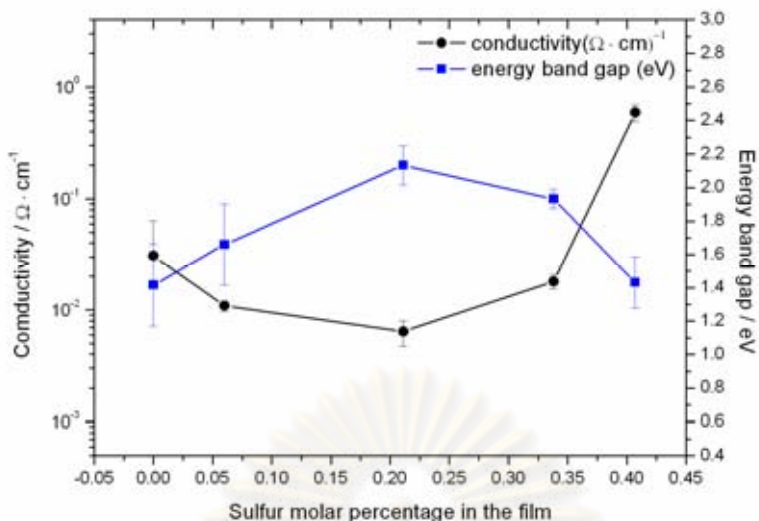


รูปที่ 4.7 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC โดยสเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ต

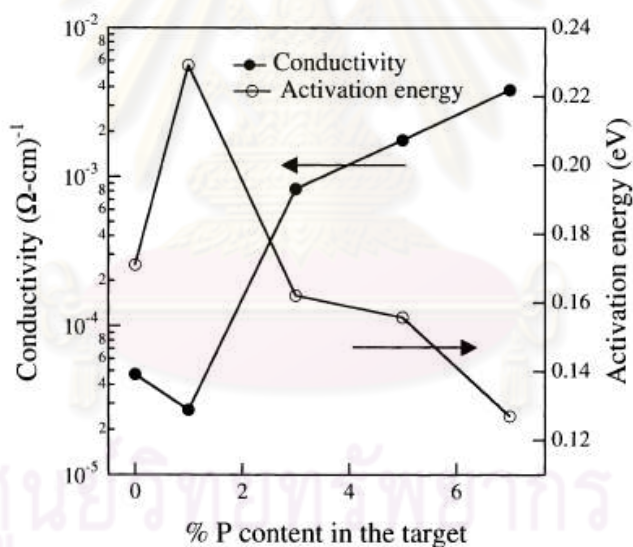


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดยวิธี-วิธีเบิลสเปกโทรสโกปีและสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี

เมื่อศึกษาผลของแถบพลังงานและค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม พบว่าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.21% ในฟิล์ม ค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลง แต่ค่าแถบพลังงานเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.211-0.41% ในฟิล์ม ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ค่าแถบพลังงานลดลงแสดงดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้เป็นไปตามทฤษฎีเมื่อค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลงค่าแถบพลังงานจะมีระยะห่างระหว่าง valence band และ conduction band เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ระยะห่างระหว่าง valence band และ conduction band เข้าใกล้กันมากขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mominuzzaman และคณะ[33] ศึกษาผลของปริมาณฟอสฟอรัสต่อสภาพนำไฟฟ้าบนวัสดุรองรับควอตซ์และพลังงานกระตุ้นโดย spectral transmittance and reflectance พบว่าพลังงานกระตุ้นในฟิล์ม DLC มีค่า 0.17 eV และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 0.23 eV ที่ปริมาณฟอสฟอรัส 1% และสภาพนำไฟฟ้าลดลงจาก  $5 \times 10^{-5} (\Omega \text{cm})^{-1}$  เป็น  $2.5 \times 10^{-5} (\Omega \text{cm})^{-1}$  เมื่อปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มเพิ่มมากขึ้นถึง 7% พบว่าพลังงานกระตุ้นลดลงและสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 0.12 และ  $3.8 \times 10^{-3} (\Omega \text{cm})^{-1}$  ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเข้าร่วมของสารเจือที่อยู่ในฟิล์ม โดยปริมาณฟอสฟอรัสมีผลทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจนถึงในระดับหนึ่งค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเจือฟอสฟอรัสในปริมาณมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.10



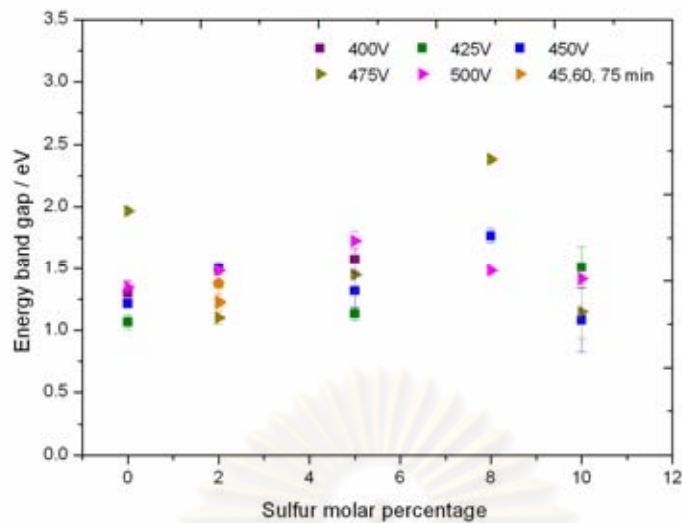
รูปที่ 4.9 แถบพลังงาน โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม



รูปที่ 4.10 แถบพลังงาน โดยยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และสภาพการไฟฟ้าของฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัส 0-7% [33]

เมื่อศึกษาผลของแถบพลังงานต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ 400-500V พบว่าฟิล์ม DLC ให้ค่าแถบพลังงานในช่วง 1.06-1.97 eV เป็นไปตามทฤษฎี ฟิล์ม DLC ชนิด a-C มีค่าแถบพลังงาน 0.5-1.5 eV และฟิล์ม DLC ชนิด a-C:H มีค่า 1.0-2.2 eV และฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41%ในฟิล์ม ให้ค่าแถบพลังงานในช่วง 1.1-2.38eV ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และเวลา



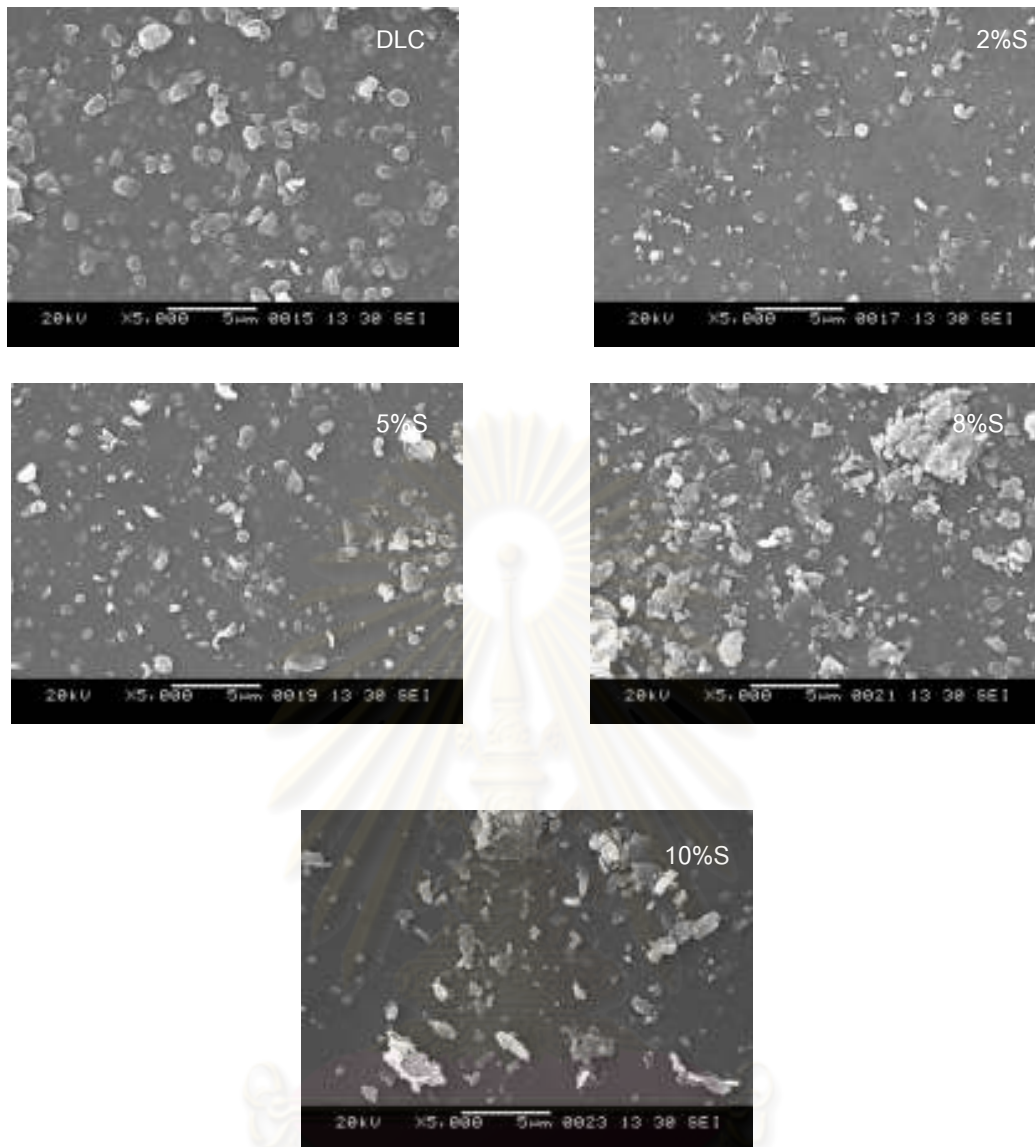


รูปที่ 4.11 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม ความต่างศักย์ 400-500V และเวลา 30-75 min โดยสเปกโตรสโคปอิลลิปโซเมทรี

### 4.3 สมบัติทางกายภาพ

#### 4.3.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10%

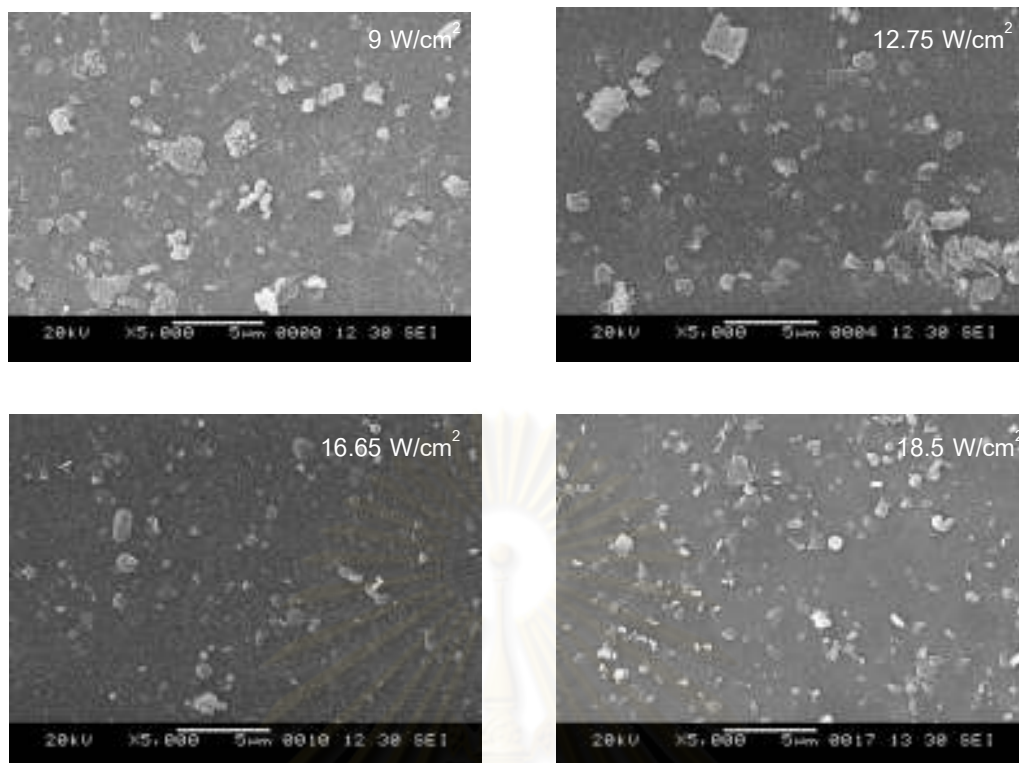
ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ในปริมาณ 0-0.41% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่า ฟิล์ม DLC มีลักษณะพื้นผิวเป็นเกรน แต่เมื่อเจือปริมาณซัลเฟอร์ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กๆกระจายทั่วฟิล์ม นอกจากนี้ในฟิล์มจะประกอบด้วยปริมาณแกรไฟต์และซัลเฟอร์ยังประกอบด้วย ธาตุ ซิลิคอน 18.23-31.08 % โดยน้ำหนัก ออกซิเจน 19.19-36.52% โดยน้ำหนัก ไฮเดียม 4.82-6.45% โดยน้ำหนัก แมกนีเซียม 0.91-1.78% โดยน้ำหนัก และแคลเซียม 3.26-5.41% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณการเจือ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ของ Latha K Fumari และ S V Subramanyam [29]สังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอน-ซัลเฟอร์คอมโพสิตพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟอร์ความหนาแน่นของอะตอมคาร์บอนจะไม่สม่ำเสมอ มีรูปร่างคล้ายทรงกลมคือแกรไฟต์ขนาดเฉลี่ย  $0.5-0.7 \mu\text{m}$  และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไม่ได้ทำให้ขนาดของแกรไฟต์เดี่ยวใหญ่ขึ้นแต่จะเกิดการเข้าไปรวมกลุ่มของอะตอมแกรไฟต์ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V

#### 4.3.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

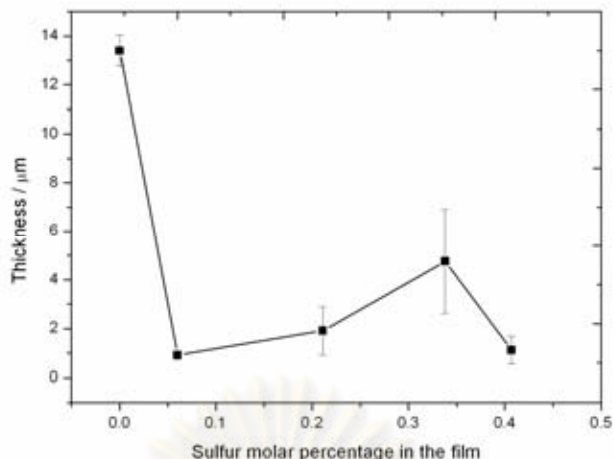
ในการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟออร์ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 9 -18.5 W/cm<sup>2</sup> บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่าฟิล์ม DLC มีลักษณะพื้นผิวเป็นเกรน แต่เมื่อเจือปริมาณซิลเฟออร์ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟออร์ 0.06% ในฟิล์ม พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กๆกระจายทั่วฟิล์มทั้งนี้ขึ้นกับความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เมื่อให้ปริมาณของอะตอมที่สูงจะเห็นว่าบนพื้นผิวฟิล์มจะให้อะตอมแกรไฟต์มากขึ้นด้วยแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบนตัวรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr  
ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (a) 9 (b) 12.75 (c) 16.65 (d) 18.5 W/cm<sup>2</sup>

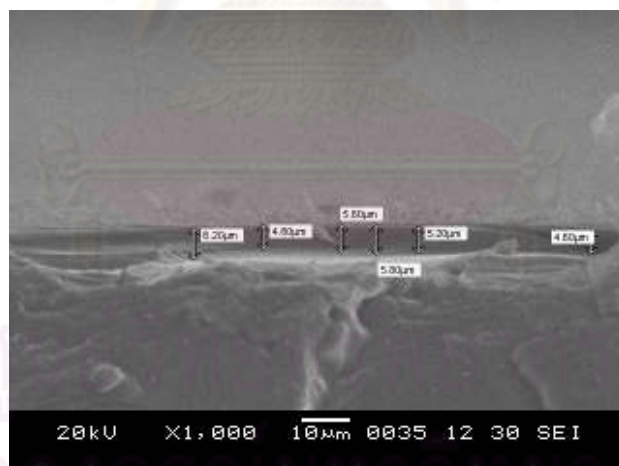
#### 4.3.3 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดย SEM

ในการศึกษาผลของความหนาที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V และนำไปวิเคราะห์ cross section โดย SEM พบว่าฟิล์ม DLC มีความหนาประมาณ 13.8  $\mu\text{m}$  และเมื่อเจือซิลเฟอร์ที่ 0.06-0.41% ในฟิล์ม มีความหนาในช่วง 0.87 -5.7  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์ม DLC มีการจัดเรียงตัวในระนาบเดียวกันอย่างแน่นหนา แต่เมื่อเจือปริมาณซิลเฟอร์พบว่าฟิล์มจะมีความหนาลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการบรรจุกันในระนาบเดียวกันของฟิล์ม DLC และซิลเฟอร์เกิดช่องว่างขึ้นของแต่ละอะตอมจึงทำให้ความหนาที่ได้หลังจากการเจือมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความหนาของฟิล์มกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06-0.41% ในฟิล์ม โดย cross section จาก SEM

รูปที่ 4.15 แสดง cross section โดย SEM ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 0.211% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V ศึกษาโดยหักฟิล์มเพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มและวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน

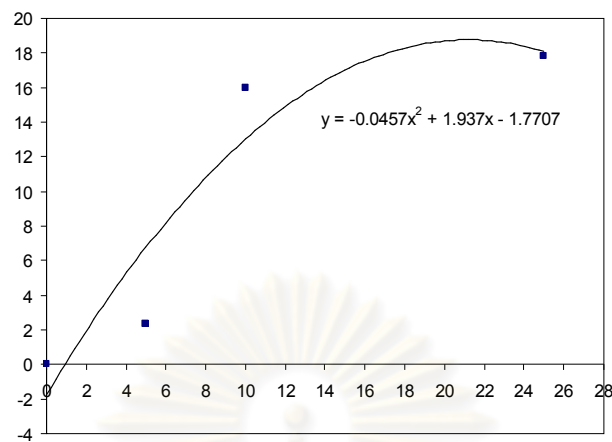


รูปที่ 4.15 Cross-sectional จาก SEM ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.34% ในฟิล์ม บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน

#### 4.3.4 ศึกษาปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดย EDX

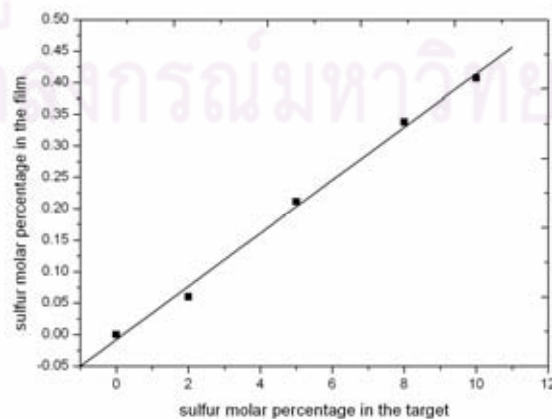
ในการศึกษาปริมาณของซัลเฟอร์ที่อยู่ในฟิล์ม DLC ซึ่งเป้าที่ใช้ในการทดลองเป็นเป้าที่ผู้วิจัย อัดขึ้นเองซึ่งกล่าวรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 3.2 โดยมีปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์

0-0.41% ในฟิล์ม ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาชุดการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 0, 1, 5, 10 และ 25 % ในเป้า ซึ่งสามารถทำคาลิเบชัน ดังรูปที่ 4.17

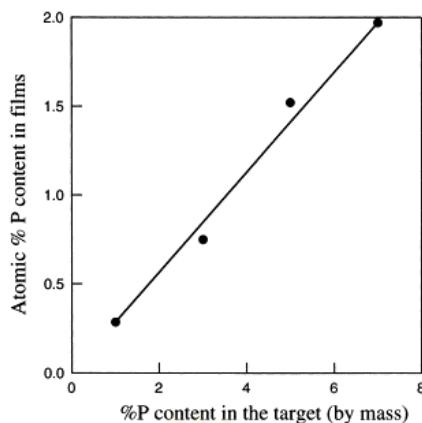


รูปที่ 4.16 กราฟคาลิเบชันจากการศึกษาชุดการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่ปริมาณซัลเฟอร์ 0, 1, 5, 10 และ 25% ในเป้า

จากรูปที่ 4.17 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งสามารถทราบปริมาณของซัลเฟอร์ที่อยู่ในฟิล์ม จากเป้าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ 0,2,5,8 และ10% โดยโมล แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อให้ปริมาณซัลเฟอร์ที่ 2-10 % โดยโมล ในฟิล์มจะมีปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น จาก 0.060-0.41 % โดยโมล ซึ่งมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharif Mohammad Mominuzzaman และคณะ[33] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือฟอสฟอรัสที่ 1,3,5,7 โดยมวล ใช้เทคนิค pulsed laser deposition บนวัสดุรองรับ Silicon และ Quartz ศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มโดย(X-ray photoelectron spectroscopic, XPS) พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มเป็นฟังก์ชันกับปริมาณฟอสฟอรัสในเป้า โดยปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 0.29-2% โดยมีฟอสฟอรัสในเป้า 1-7% ในฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18



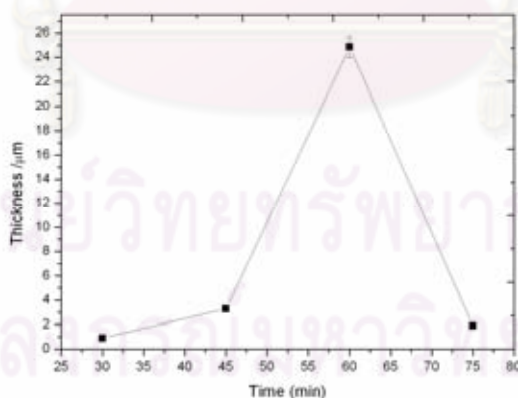
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบปริมาณซัลเฟอร์ในฟิล์มต่อปริมาณซัลเฟอร์ในเป้าที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในฟิล์ม และในเป้าที่ฟอสฟอรัส 1,3,5,7 โดยมวล [ 33]

#### 4.3.5 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ต่ออัตราการสังเคราะห์ฟิล์มที่เวลา 30-75 นาที

ในระบบสเปกโตรอิเล็กโทรเคมีเคลือบฟิล์มขึ้นกับปริมาณของอะตอมที่หลุดออกมาจากเป้าและการเคลื่อนที่ของอะตอมมายังวัสดุรองรับพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสเปกโตรอิเล็กโทรเคมีจาก 30-60 นาที อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าสูงมากขึ้นจาก 0.03-0.41  $\mu\text{m}/\text{min}$  เนื่องจากอะตอมจากการสเปกโตรอิเล็กโทรเคมีออกมามากและสามารถเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับได้ดีแต่เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้น อัตราการสเปกโตรเคมีต่ำลง 0.02  $\mu\text{m}/\text{min}$  ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับไม่สะดวก แสดงดังรูปที่ 4.19

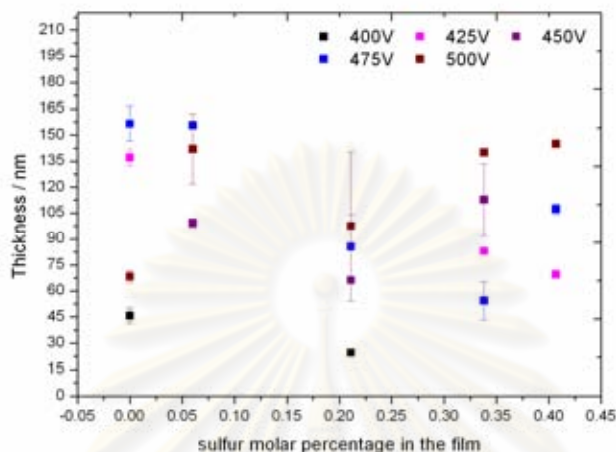


รูปที่ 4.19 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม เวลา 30-75 นาที

#### 4.3.6 ความหนาของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี

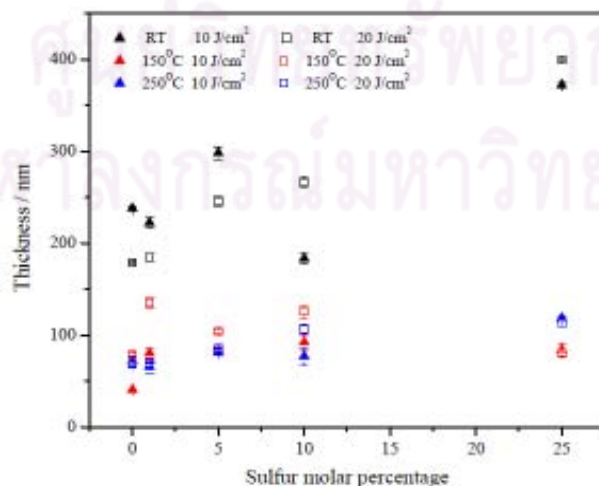
ในการศึกษาผลของความหนาที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V และนำไปวิเคราะห์โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี พบว่า

ฟิล์ม DLC มีความหนาประมาณ 68.28-156.58 nm และฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06-0.41 % ในฟิล์ม มีความหนาในช่วง 24.51–264.79 nm โดยทั้งนี้การหาความหนาได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อ 2.9 โดยทั้งนี้ความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับความต่างศักย์และเวลาที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.20

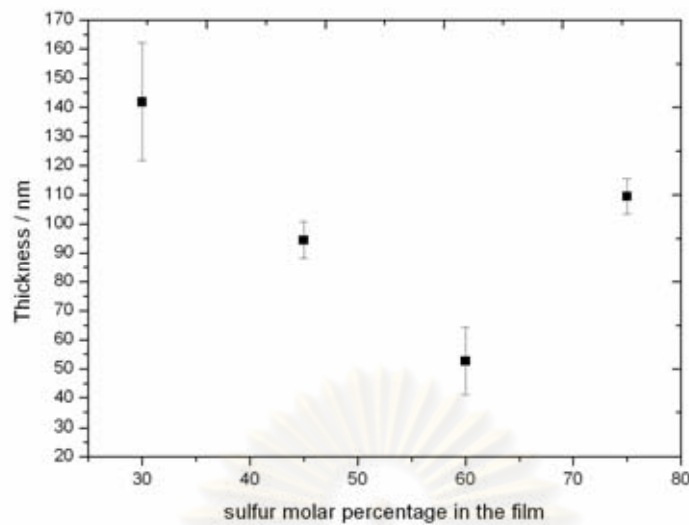


รูปที่ 4.20 ความหนาของฟิล์มกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06-0.41% ในฟิล์ม ที่ความต่างศักย์ 400-500V เวลา 30-75 นาที

ทั้งนี้ยังพบว่าในงานวิจัยของ K.Honglertkongsakul [32] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ โดยวิธี pulsed laser ablation ArF ที่ 193 nm บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนหาความหนาของฟิล์มจากทั้ง 2 วิธีพบว่าฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วงร้อยนาโนเมตรทั้งวิธี SEM และ โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี ทั้งนี้ขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับ การกระจายตัวของแกรไฟต์ที่ไม่สม่ำเสมอในเป้าที่ใช้ในการทดลอง และเกิดจากการหักของฟิล์ม ในการวิเคราะห์โดย SEM



รูปที่ 4.21 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0-25% ที่เลเซอร์ 10-20 J/cm<sup>2</sup> และอุณหภูมิวัสดุรองรับ 150 และ 250 °C [32]



รูปที่ 4.22 ความหนาของฟิล์มกับปริมาณซัลเฟอร์ 0-0.41 % ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 นาที

ทั้งนี้จากผลการทดลองที่ได้จาก SEM และ โดยสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก วิธี SEM หาค่าความหนาได้จากการหักฟิล์ม เพื่อให้เห็นรอยแยกระหว่างชั้นฟิล์ม ซึ่งเป็นการมองด้วยตา ซึ่งในการทดลองผู้วิจัยเลือกที่จะเชื่อผลของ SEM เนื่องจากวิธีสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี หาได้จากเครื่องมือโดยการพิศภาพโดยการเลือกชนิดของสารในการพิศจากรายชื่อสารที่มีทั้งหมดในโปรแกรมจากเครื่อง ปรากฏว่าสารที่ใช้ในการพิศโมเดลอาจจะไม่ตรงกับชนิดของ DLC ที่เราสังเคราะห์ได้ กราฟที่ได้บางเงื่อนไขจึงไม่ค่อยพิศมากนัก

#### 4.4 สมบัติทางโครงสร้าง

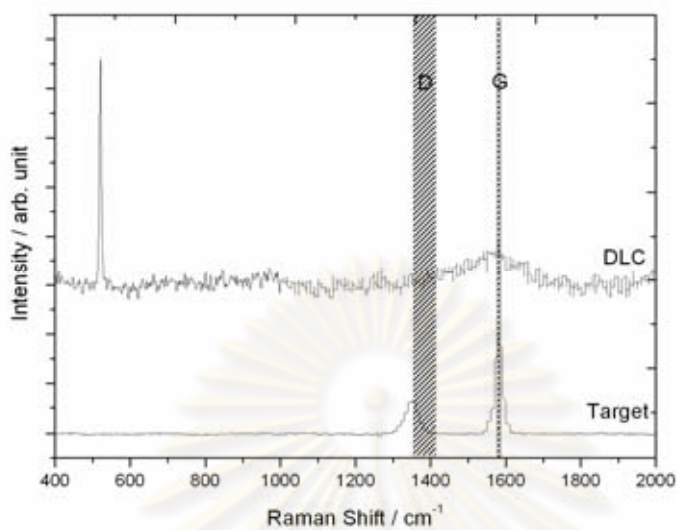
ในงานวิจัยนี้นำเอาฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นในภาวะการสังเคราะห์ต่างๆ ไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยรามานสเปกโทรสโกปี ด้วยเครื่อง DXR SmartRaman โดยใช้เลเซอร์จาก Ar ที่มีความยาวคลื่น 532 nm เป็นตัวกระตุ้น ณ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์พลาสมา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้แยกศึกษาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีก G ต่อฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม

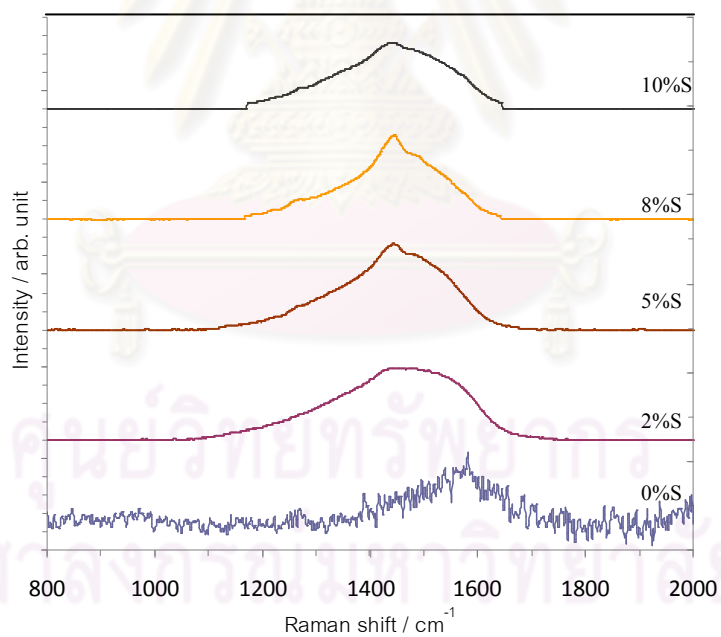
ในการศึกษาที่ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ไฟฟ้า 500 โวลต์ ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยปรากฏสเปกตรัมรามานที่ปรากฏพีก D และพีก G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1413 และ 1573  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์ 0.06-0.41% ในฟิล์ม พบว่าตำแหน่งพีก G เลื่อนลงจากเลขคลื่น 1573 ไปที่เลขคลื่น 1477  $\text{cm}^{-1}$  และ



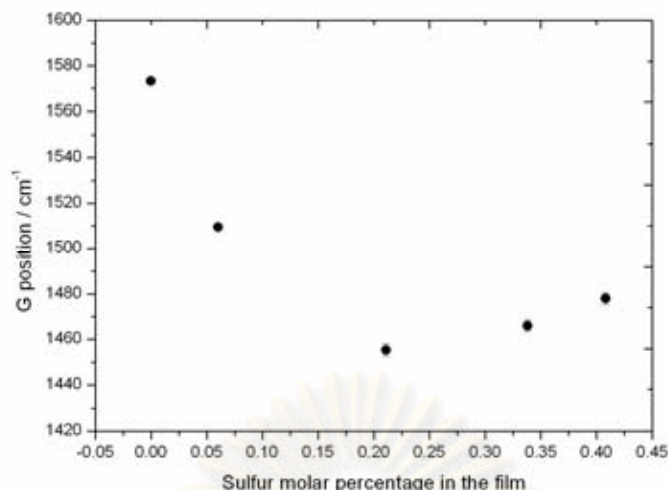
อัตราส่วน  $I_D/I_G$  เพิ่มขึ้นจาก 0.43 ไป 0.52 แสดงถึงความเป็นเพชรเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC และ เป้าแกรไฟต์

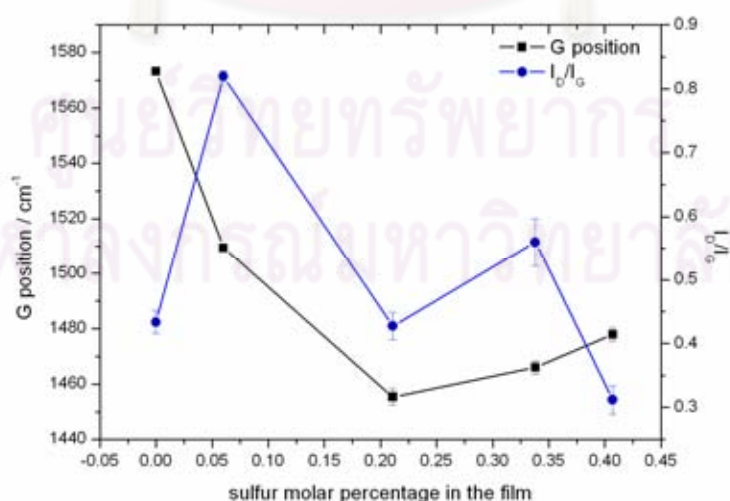


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซิลเฟออร์ 0-0.41% ในฟิล์ม



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม

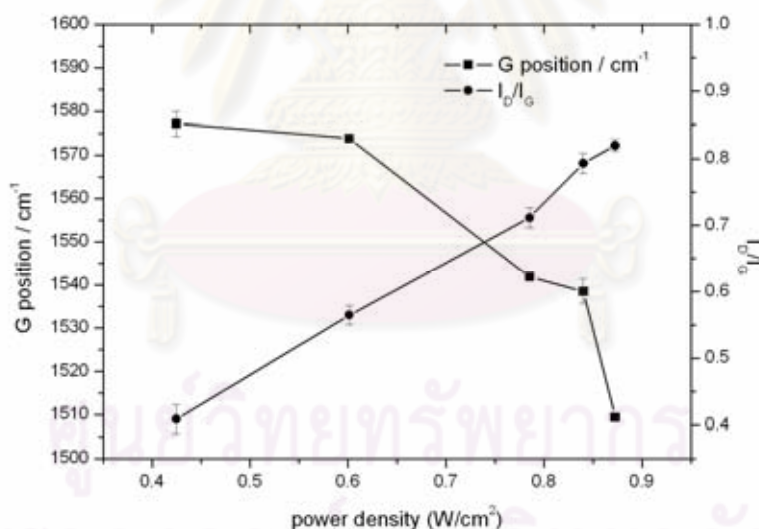
จากการศึกษารายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ พบรายงานผลของการเจือซัลเฟอร์ในฟิล์มเพชร ในการทดลองของ Mikka Nishitani-Gamo และคณะ[28] ศึกษาการปลูกฟิล์มบางผลึกเดี่ยว (homoepitaxial) เจือซัลเฟอร์ในฟิล์มเพชรโดยวิธี CVD บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน ที่มีการปรับปรุงโครงสร้างให้มีผลึกเดี่ยวโดยทำที่อุณหภูมิและความดันสูงใช้แก๊ส H<sub>2</sub>S ความเข้มข้น 10-100 ppm พบว่าตำแหน่งพีคเคลื่อนจาก 1332.5 ไปยัง 1339 cm<sup>-1</sup> เมื่อเจือในปริมาณเล็กน้อย 50 ppm ตำแหน่งเลขคลื่นจะเคลื่อนไปเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากความยาวของอะตอมคาร์บอนในเพชรมีค่า 154 pm และความยาวของอะตอมซัลเฟอร์มีค่า 185 pm



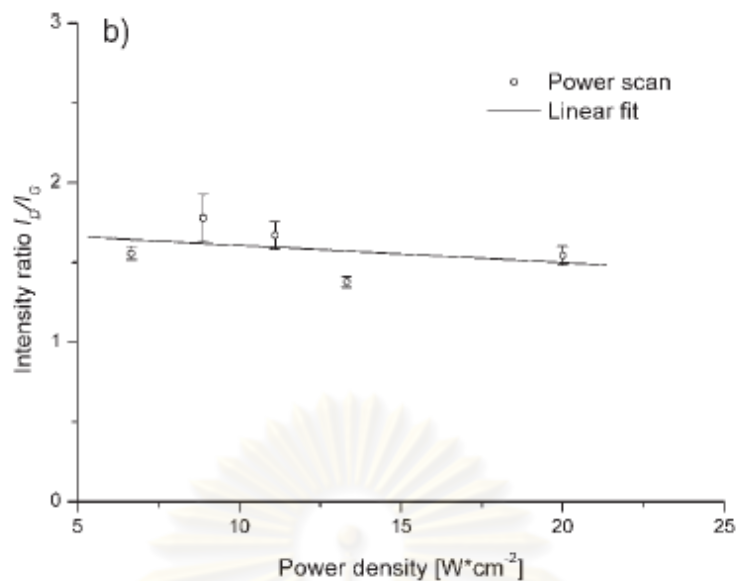
รูปที่ 4.26 อัตราส่วนความเข้มของ I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> และ ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-0.41% ในฟิล์ม

#### 4.4.2 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีก G ต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

ในการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซิลเฟอรินปริมาณ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 9 -18.5 W/cm<sup>2</sup> บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนพบว่า ฟิล์ม DLC มีอัตราส่วน  $I_D/I_G$  เพิ่มขึ้น และตำแหน่งของพีก G ลดลง แสดงค่าเมื่อเพิ่มกำลังความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นค่าฟิล์มมีความเป็นเพชรเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับตำแหน่งของพีก G ที่มีแนวโน้มลดลงแสดงดังรูปที่ 4.27 ทั้งนี้ให้ผลการทดลองที่ตรงข้ามกับ Markus Kahn และคณะ [21] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือไนโตรเจน โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน (100) และกระจกสไลด์ ความต่างศักย์ในช่วง 600- 700V โดยศึกษาผลของความหนาแน่นของกำลังในการสปัตเตอริงในช่วง 6.7-20 Wcm<sup>-2</sup> เมื่อวิเคราะห์โดยรามานชนิด LabRam โดยใช้ Nd-YAG ที่ความยาวคลื่น 532 nm. ปรากฏพีก G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1550 cm<sup>-1</sup> (Graphite band) และปรากฏพีก D ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1355 cm<sup>-1</sup> (Disordered band) และอัตราส่วน  $I_D/I_G$  มีค่า  $1.56 \pm 0.04$  ที่การสังเคราะห์ที่ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 6.7 W cm<sup>-2</sup> และพบว่าที่กำลังในการสปัตเตอริงต่ำจะทำให้ฟิล์มมีปริมาณของ  $sp^3$  สูง และไม่แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน  $I_D/I_G$  อย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 4.28



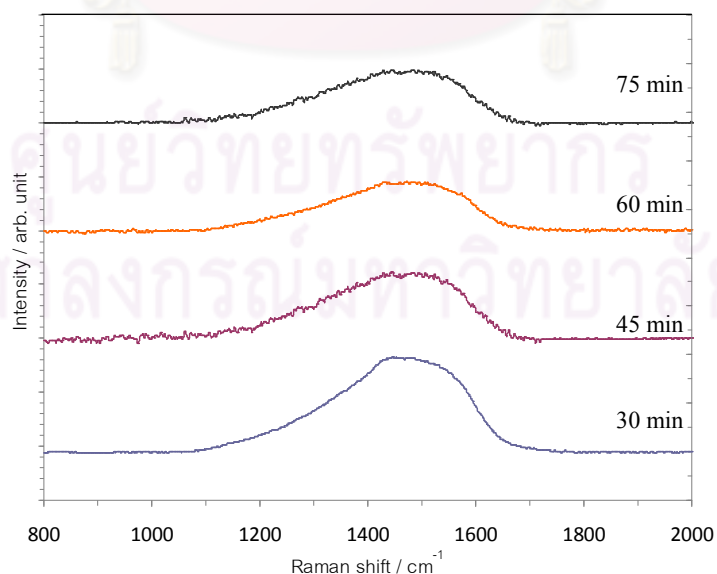
รูปที่ 4.27 อัตราส่วนความเข้มของ  $I_D/I_G$  และ ตำแหน่งของพีก G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า



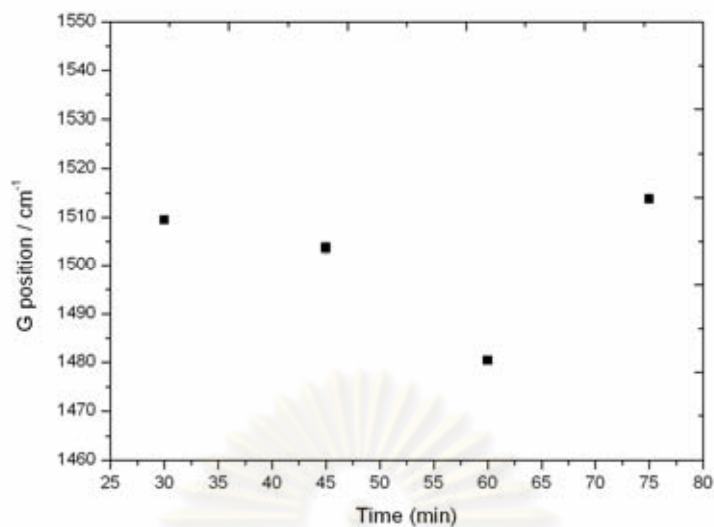
รูปที่ 4.28 อัตราส่วนความเข้มของ  $I_D/I_G$  จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 6.7-20  $Wcm^{-2}$  [21]

#### 4.4.3 อัตราส่วน $I_D/I_G$ และตำแหน่งพีก G ต่ออัตราการสังเคราะห์ฟิล์ม

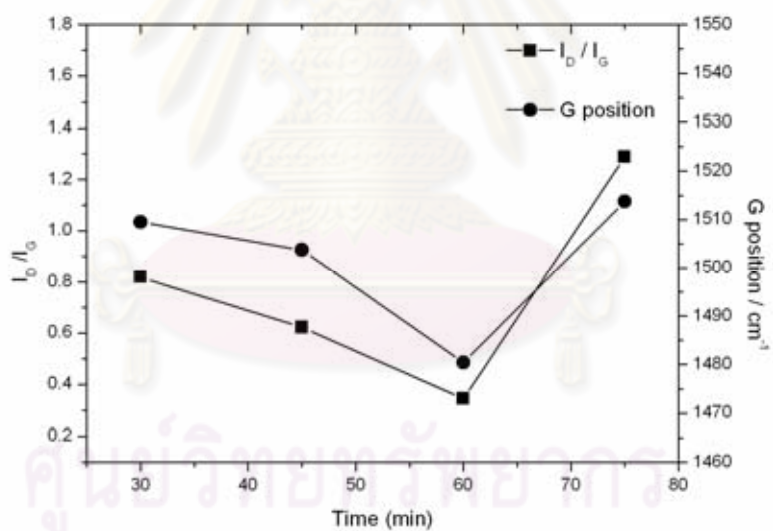
ในการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ในปริมาณ 0.06% ในฟิล์ม ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr ความต่างศักย์ 500 V บนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอน โดยศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์ พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาจาก 30-60 นาที ฟิล์ม DLC มีอัตราส่วน  $I_D/I_G$  ลดลง และตำแหน่งของพีก G ลดลงด้วยเช่นกัน แสดงค่าฟิล์มมีค่าสภาพไฟฟ้าที่ลดลงแต่เมื่อเพิ่มเวลาเพิ่มมากขึ้นทั้งอัตราส่วน  $I_D/I_G$  และตำแหน่งของพีก G เพิ่มขึ้น แสดงว่าฟิล์มมีสภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 min



รูปที่ 4.30 ตำแหน่งของพีค G จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06 % ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 min



รูปที่ 4.31 อัตราส่วนความเข้มของ  $I_D/I_G$  จากสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม ที่เวลา 30-75 min

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนวัสดุรองรับเวเฟอร์ซิลิคอนและควอตซ์ ในบรรยากาศของอาร์กอนที่ความดัน  $8 \times 10^{-2}$  ทอร์ โดยศึกษาผลฟิล์ม DLC เจือซัลเฟอร์ที่ 0-0.41% ในฟิล์มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่  $0.9 - 18.5 \text{ W/cm}^2$  และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 30- 75 นาที โดยวิธีการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รามาน สเปกโทรสโกปี อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี สเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมตรี และวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสที่ไหลผ่านฟิล์ม

##### 5.1.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ที่ใช้เป็นเป้าที่ 0-10%

การสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ปริมาณสารเจือซัลเฟอร์ในปริมาณน้อยมีผลต่อค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มพบว่าฟิล์ม DLC มีค่าสภาพนำไฟฟ้า  $2.82 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ถึง  $1.84 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  แต่เมื่อเจือปริมาณซัลเฟอร์ที่เหมาะสมที่ 0.41% ในฟิล์ม กลับพบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น  $5.95 \times 10^{-1}$  ถึง  $5.21 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  และสอดคล้องกับค่าแถบพลังงาน (band gap) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงของฟิล์ม DLC โดยมีค่า 1.4- 2.2 eV ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างทางเคมีของรามานปรากฏสเปกตรัมรามานของฟิล์ม DLC ที่พีก D  $1413 \text{ cm}^{-1}$  และพีก G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1573 \text{ cm}^{-1}$  และเมื่อเจือซัลเฟอร์ 0.06-0.41% ในฟิล์ม ตำแหน่งพีก G เลื่อนลงจากเลขคลื่น  $1573$  ไปที่เลขคลื่น  $1477 \text{ cm}^{-1}$  โดยอัตราส่วน  $I_D/I_G$  เพิ่มขึ้นจาก 0.43 ไป 0.52 แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นเพชรเพิ่มมากขึ้น และสามารถดูลักษณะทางกายภาพจาก SEM พบว่ามีอนุภาคของแกรไฟต์ขนาดไมครอนกระจายกระจายทั่วพื้นผิวฟิล์ม

##### 5.1.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อลักษณะฟิล์ม DLC

จากการศึกษาเมื่อวิเคราะห์ผลของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อฟิล์ม DLC ที่ 0, 0.06 และ 0.41 % ซัลเฟอร์ในฟิล์ม พบว่า ฟิล์ม DLC ที่มีการเจือซัลเฟอร์ 0.06% ในฟิล์ม พบว่าเมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะให้สภาพนำไฟฟ้าที่ลดลง และเมื่อวิเคราะห์ทางกายภาพจาก SEM พบว่าไม่ค่อยมีความแตกต่าง ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ศึกษาไม่ได้มีค่าแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเป็นค่าสูงที่สุดที่แหล่งจ่ายกระแสในการทดลอง สามารถที่จะสังเคราะห์ฟิล์มได้เมื่อวิเคราะห์ทางโครงสร้างจากรามานเมื่อกำลังความหนาแน่นไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ฟิล์มมีความเป็นเพชรเพิ่มมากขึ้น

ซึ่งสอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลง และที่ปริมาณ 0.06 % ซัลเฟอร์ในฟิล์มให้ค่าแถบ พลังงานที่น้อยที่สุดในช่วงการ 1.1-1.5 eV

### 5.1.3 การศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์ต่อลักษณะฟิล์ม DLC

จากการศึกษาตัวแปรเวลาในการสังเคราะห์ที่ 30-75 นาที และพิจารณาในรูปของอัตราการสังเคราะห์ พบว่าอัตราการสังเคราะห์ขึ้นกับค่าความหนาของฟิล์ม เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น 30-60 นาที ค่าความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้นด้วยจาก 0.03-0.41  $\mu\text{m}/\text{min}$  แต่เมื่อเพิ่มเวลาจนถึง 75 นาที ค่าความหนากลับลดลงส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์ลดลงด้วยเช่นกันคือ 0.02  $\mu\text{m}/\text{min}$  ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างทางเคมีที่ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ตำแหน่งพีค G เลื่อนลงจากเลขคลื่น 1509 ไปที่เลขคลื่น 1480  $\text{cm}^{-1}$  ค่าสภาพนำไฟฟ้าลดลงจาก  $1.09 \times 10^{-2} - 2.3 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  และเมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์จาก 60-75 นาที คือตำแหน่งพีค G เลื่อนขึ้นจากเลขคลื่น 1480 ไปที่เลขคลื่น 1513  $\text{cm}^{-1}$  ค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก  $2.3 \times 10^{-3} - 2.3 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีปริมาณของซัลเฟอร์เข้าร่วมในฟิล์มในปริมาณที่มากเกินไปจึงทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าลดลง แต่เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพโดย SEM ไม่ค่อยเห็นความแตกต่างเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงให้ได้ฟิล์มที่หนาขึ้นควรที่จะปรับเปลี่ยนหัวแมกนีตรอนให้มีความแรงของสนามแม่เหล็กมากขึ้น อาจจะเพิ่มเป้าที่ใช้ในการสังเคราะห์หลายอัน และปรับให้แท่นวางวัสดุรองรับหมุนได้เพื่อที่จะได้ใช้กับรูปทรงของวัสดุรองรับที่หลากหลายมากขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1.] Kayani, A.N. Deposition and Characterization of Diamond-Like Carbon Films With and Without Hydrogen and Nitrogen. Doctoral dissertation, Department of Physics and Astronomy the College of Arts and Science Ohio University, 2003.
- [2.] Robertson, J. Properties of diamond-like carbon. *Surf. Coat. Technol.* 50(1992): 185-203.
- [3.] Grill, A. Electrical and optical properties of diamond-like carbon. *Thin Solid Films* 355,356 (1999): 189-193.
- [4.] Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon. *Material science and engineering*. R37(2002): 129-281
- [5.] Robertson, J. Defect in diamond-like carbon. *Phys. Stat. Sol. (a)*.186(2001): 177-185
- [6.] Monaghan, D.P, Laing, K.C, Logan, P.A, Teer, P. and Teer, D.G., *Materials World*1(6): 347-349
- [7.] Zellama Kacem. Tetrahedral carbons. *Solid State & materials Science*. 4(1999):34-38
- [8.] อัญชัญ หมวกงาม. การศึกษาลักษณะเฉพาะของรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรตกสะสมโดยเทคนิคอาร์เอฟ-พีอีซีวีดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [9.] Staryga, E. Bak, G.W. Relation between physical and electrical properties of diamond-like carbon thin films. *Diamond&Related Material*. 14(2005)23-34
- [10.] Holland, L, Inst.P, F. *Vacuum Deposition of Thin Films*, sixth printing, Chapman and Hall Ltd, 1970.
- [11.] Chapman, Brian. *Glow Discharge Process Sputtering and plasma etching*, awiley-interscience publication
- [12.] ธนุสิทธิ์ บูรินทร์ประโคน. การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [13.] Lu, Z.G. and Chung, C.Y. 2008. Electrochemical characterization of diamond like carbon thin films. *Diamond and Related Materials* : (article in press)



- [14.] Onoprienko, A.A. Artamonov, V.V. and Yanchuk, I.B.. Effect of magnetron discharge power on the resistivity and microstructure of carbon films. *Surface & coatings Technology* 200(2006):4174-4178.
- [15.] Namwoong Paik. Raman and XPS studies of DLC films prepared by magnetron sputter-type negative ion source. *Films Surface & coatings Technology* 200(2005):2170-2174.
- [16.] M.Vojs et al., Properties of amorphous carbon layer for bio-tribological applications. Article in press
- [17.] Wei Chen, Dongchen Qi, Xingu Gao, Andrew Thye Shen Wee. Surface transfer doping of semiconductors. *Progree in Surface Science*. 84(2009):279-321.
- [18.] Gerger, I., Haubner, R. Gradient layers of boron-doped diamond on titanium substrates. *Diamond and Related Materials*. 16(2007):899-904.
- [19.] A. Sikora, Berkesse, A.et al., Structural and electrical characterization of boron-containing diamond-like carbon films deposited by femtosecond pulsed laser ablation. *Solid State Sciences*. (2008):1-4.
- [20.] Haubner, R. Comparison of sulfur, boron, nitrogen and phosphorus additions during low-pressure diamond deposition. *Diamond & Materials*. 14(2005) 355-363.
- [21.] Kahn, Markus et al., Properties of DLC and Nitrogen-Doped DLC Films Deposited by DC Magnetron Sputtering. *Plasma Process. Polym.* 4(2007): s200-s204.
- [22.] Hamilton, T. et al., X-ray absorption of nitrogen-doped amorphous carbon films for determining  $sp^2/sp^3$  bonding concentrations. *Radiation Physics and Chemistry*. 75(2006)1613-1616.
- [23.] Zhang, S. et al., A phenomenological approach for the  $I_D/I_G$  ratio and  $sp^3$  fraction magnetron sputtered a-C films. *Surface & coatings Technology* 123(2000):256-260.
- [24.] Kundoo, S, Saha, P, Chattopadhyay, K.K. Electron field emission from nitrogen and sulfur-doped diamond-like carbon films deposited by simple electrochemical route. *Materials Letters* 58(2004)3920-3924.

- [25.] Aryal, Hare Ram et al., Characteristics of nitrogen doped diamond-like carbon thin films grown by microwave surface-wave plasma CVD. *Diamond and Related Materials* 15(2006)1906-1908.
- [26.] Gheeraert, E. Casanova, N. et. al. n-Type doping of diamond by sulfur and phosphorus. *Diamond and Related Materials* .11: 289-295.
- [27.] Ghodbane, S. et al., n-type phosphorus-doped polycrystalline diamond on silicon substrates. *Diamond and Related Materials* .17(2008):1324-1329.
- [28.] Nishitani-Gamo, Mikka, Yasu, M.E. et.al. Sulfur-doped homoepitaxial (001) diamond with n-type semiconductive properties. *Diamond and Related Materials*. 9: 941-947.
- [29.] Xiaojun, Rongbin Li., Hesheng, Hu, Shen. and Xianchang, He.. Co-doping of sulfur and boron in CVD-diamond. *Materials Letters* 358(November 2000): 1835-1838.
- [30.] Kumari, Latha and Subramanyam, S V. Structural and electrical properties of amorphous carbon-sulfur composite films. *Materials Sciences*. 27(2004):289-294.
- [31] Omer, Ashraf M.M. et al. Iodine doping in amorphous carbon thin-films for optoelectronic devices. *Physic B* 376-377(2006):1316-319.
- [32.] Schreder, Bianca and Kiefer, wolfgang, *Handbook of raman spectroscopy from the research laboratory to the process line*, 2001.
- [33.] แม้น อมรสิทธิ์. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*, ชวนพิมพ์ ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ, 2535
- [34.] Honglertkongsakul, K. May, P.W. and Paosawatyanong, B. 2010. Electrical and optical properties of diamond-like carbon films deposited by pulsed laser ablation. *Diamond and Related Materials*. 19: 999-1002.
- [35.] อารีย์ วิเชียรฉาย. *เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2539
- [36.] Runyan, W.R., *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, special circuits Department Texas Instrument Incorporated ,1975
- [37.] ดุสิต เครื่องงาม. *โพลีดีสเททฟิสิกส์*. กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2535.

- [38.] ดุสิต เครื่องงาม. *สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1*. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [39.] กฤษณา ศิริเลิศมุกกุล , เครื่องมือวิจัยทางวัสดุ: กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์,วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- [40.] Hiroyuki Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry principles and applications*, John wiley & Sons, Ltd
- [41.] Morshed, M.M. Cameron, D.C. et.al.. Optical properties of DLC films deposited by the saddle field fast atom neutral beam source. *Journal of Materials Processing Technology*. 169(2005):219-222.
- [42.] ณัฐพร พรหมรส . *การออกแบบและลักษณะเฉพาะของหัวดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.



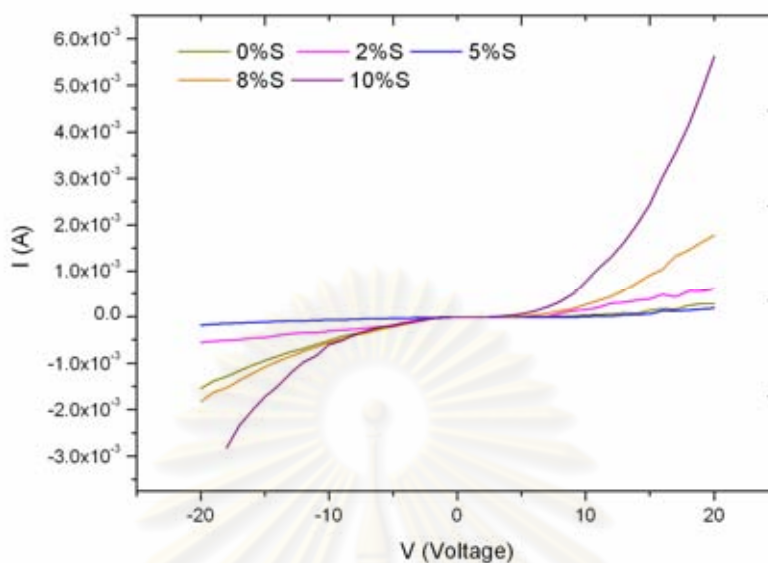
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



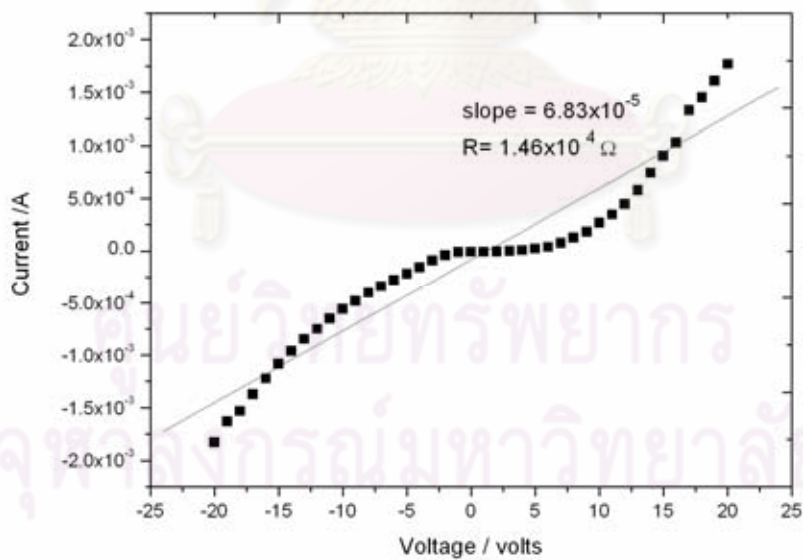
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก  
สมบัติทางไฟฟ้าที่อัตราส่วนซิลเฟอร์ 0-10%



รูปที่ ก.1 ตัวอย่างลักษณะของกระแสและความต่างศักย์ของผลของอัตราส่วนของคาร์บอนต่อซิลเฟอร์ที่ใช้เป็นเป้าต่อลักษณะการนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC



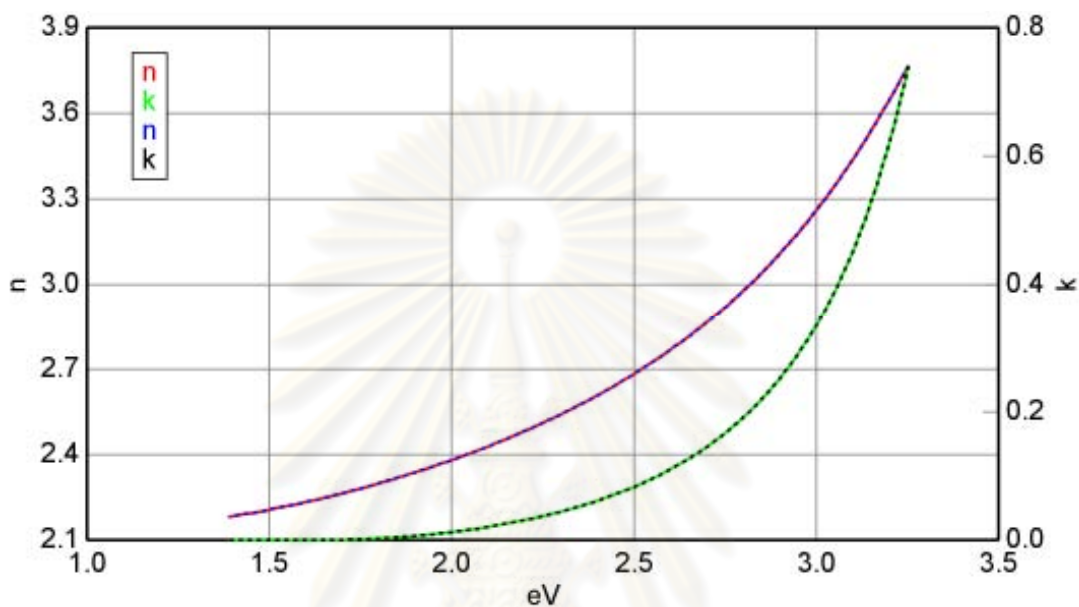
รูปที่ ก.2 ตัวอย่างพิตกราฟเส้นตรง (Fit Linear) ของลักษณะของกระแสและความต่างศักย์ของฟิล์ม DLC ที่เจือซิลเฟอร์ 8%

### ภาคผนวก ข

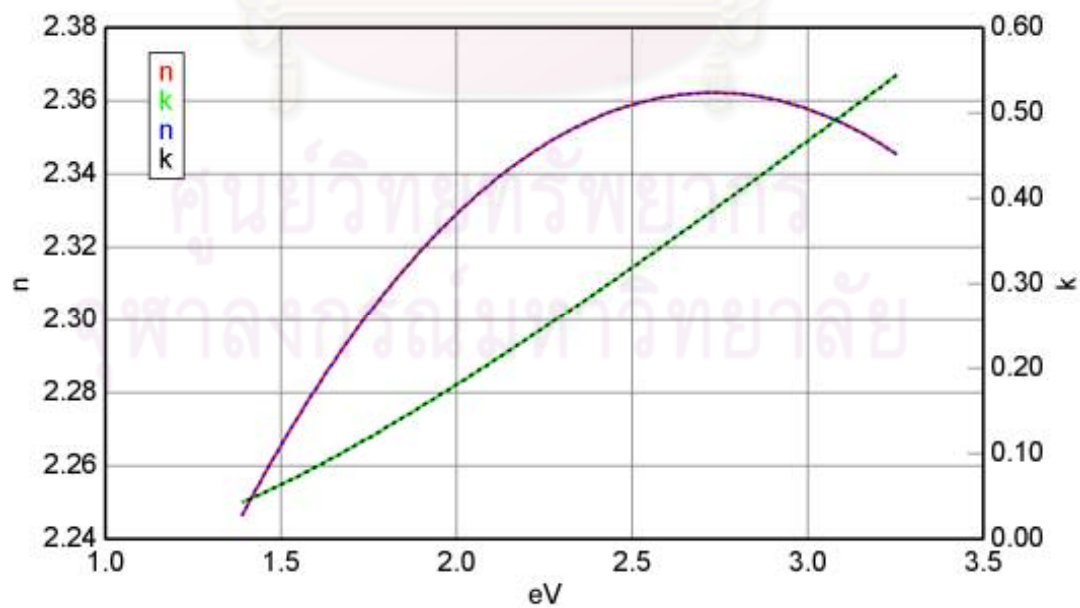
ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการฟิตโมเดล Tauc- Lorence เงื่อนไขความต่างศักย์ 500V ที่  
อัตราส่วนซิลเฟอร 0-10%

โดย  $n$  กราฟเส้นปะ คือเส้นที่เป็นโมเดล และ  $n$  กราฟเส้นทึบคือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

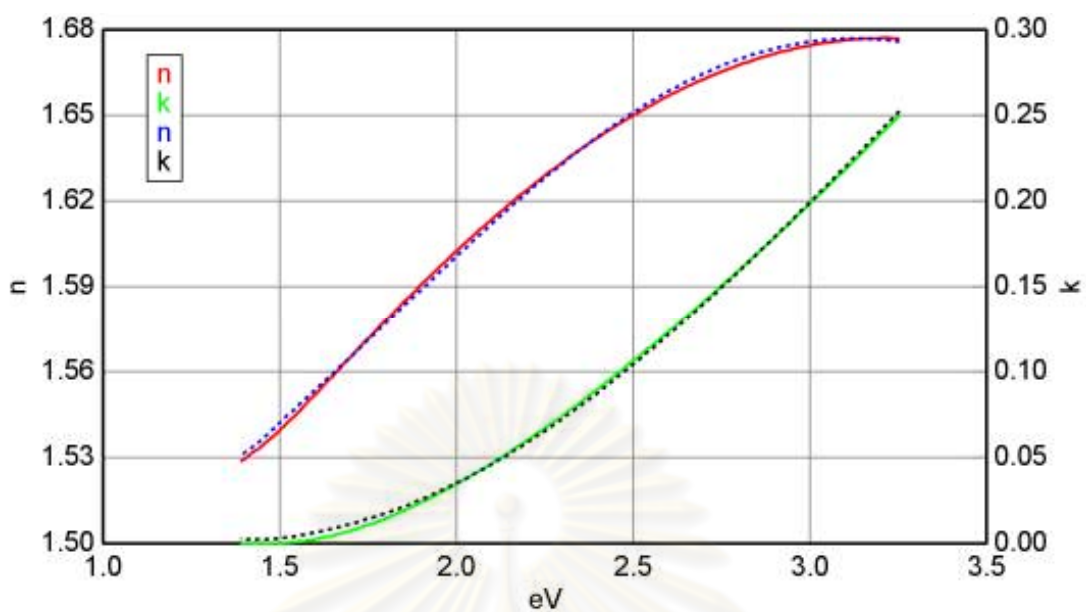
$K$  กราฟเส้นปะ คือเส้นที่เป็นโมเดล และ  $k$  กราฟเส้นทึบคือ ค่าที่ได้จากการทดลอง



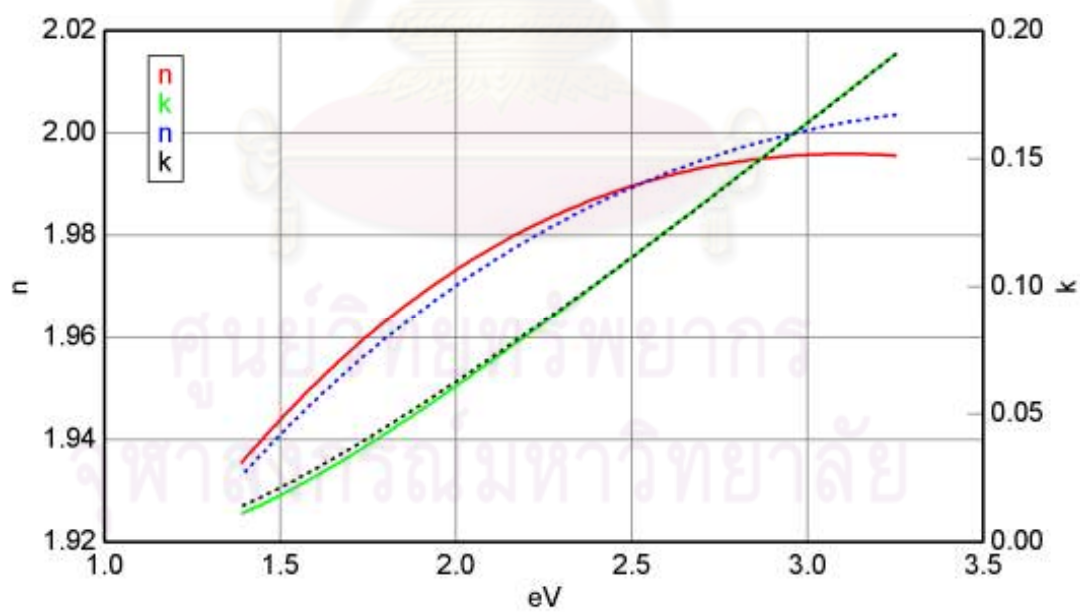
(a) DLC ที่อัตราส่วนซิลเฟอร 0%



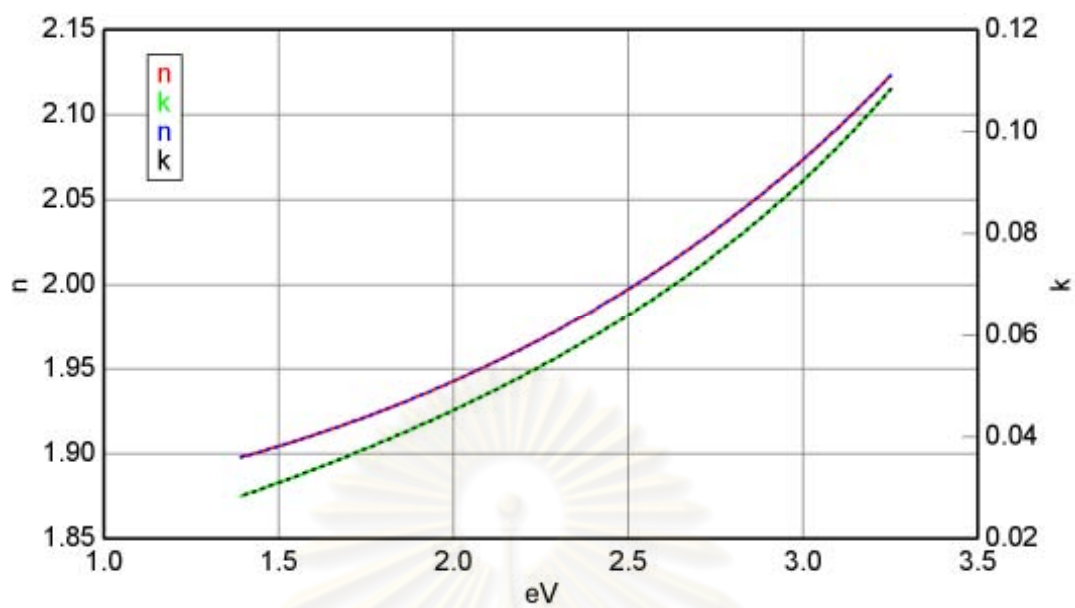
(b) DLC ที่อัตราส่วนซิลเฟอร 2%



(c) DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอน 5%



(d) DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอน 8%



(e) DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอน 10%

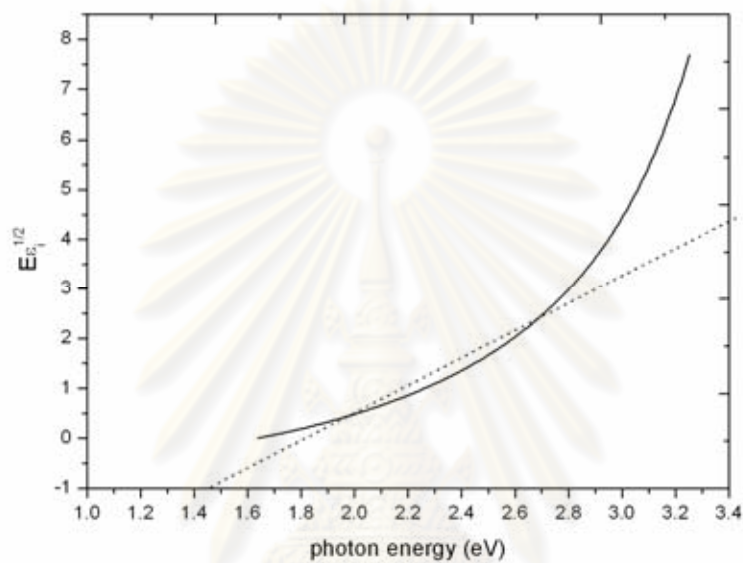
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



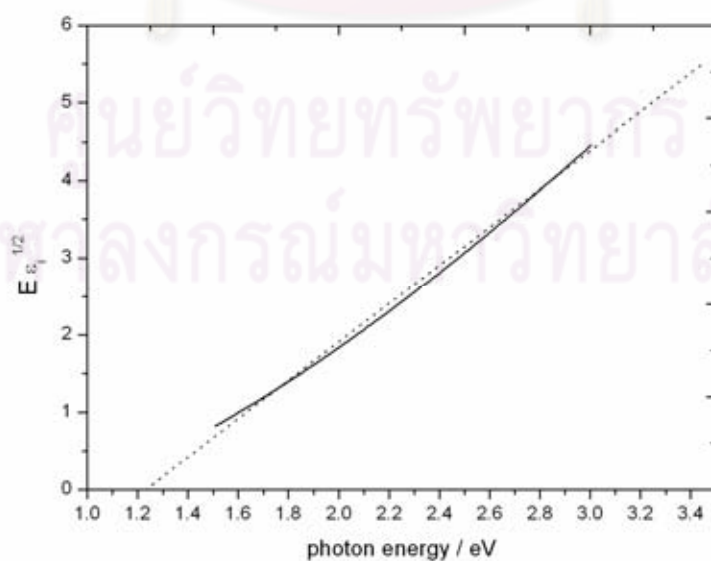
### ภาคผนวก ค

วิเคราะห์กราฟที่ได้จากการคำนวณหาค่าแถบพลังงานจากสเปกโตรสโคปิกอิลลิปโซเมทรี  
สามารถคำนวณได้ 2 วิธีซึ่งให้ผลค่าแถบพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

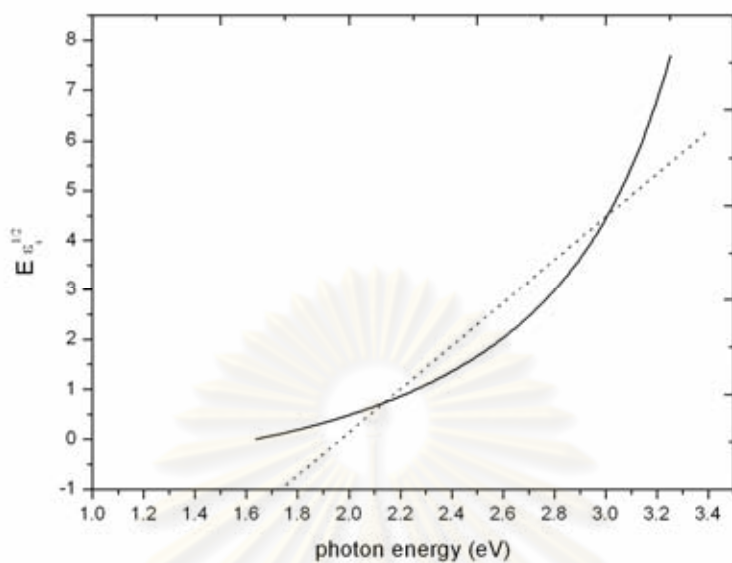
วิธีที่ 1 Fit linear



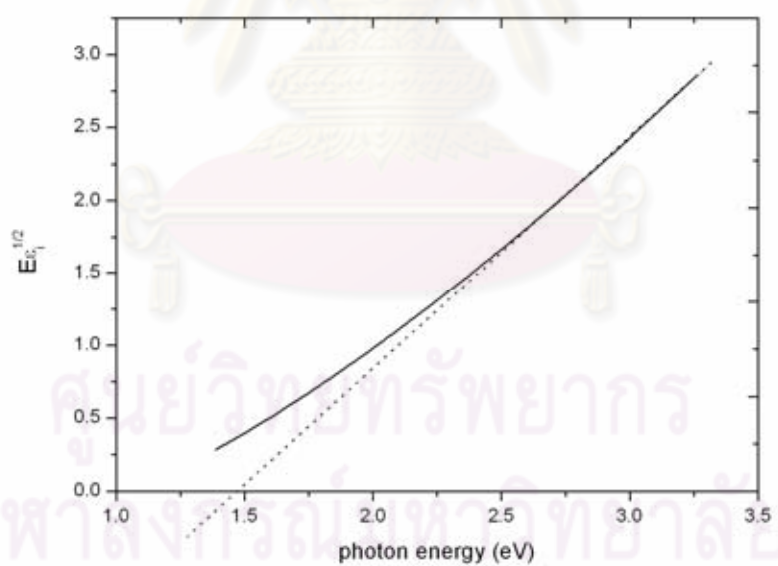
(a) DLC ที่อัตราส่วนชัลเฟอร์ 0%



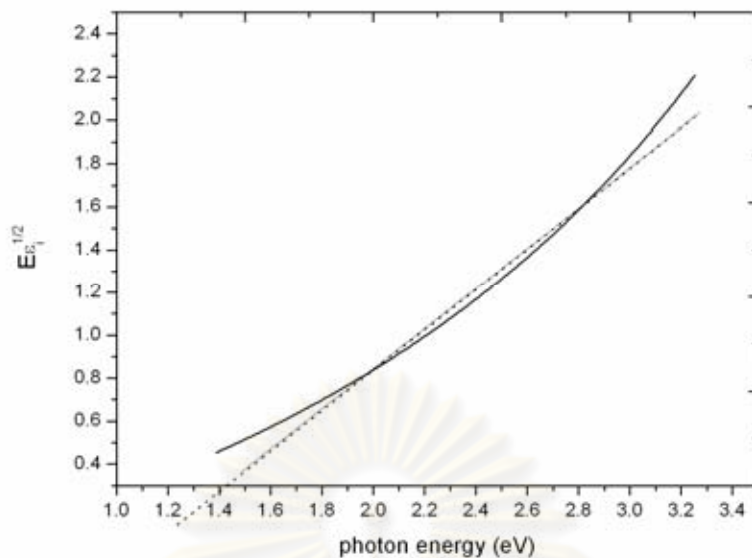
(b) DLC ที่อัตราส่วนชัลเฟอร์ 2%



(c) DLC ที่อัตราส่วนซัลเฟอร์ 5%



(d) DLC ที่อัตราส่วนซัลเฟอร์ 8%



(e) DLC ที่อัตราส่วนซิลเฟออร์ 10%

## วิธีที่ 2 Simulation Solver

ใช้ Solver ในการประมาณค่า  $E_g$  และ  $B$  (ค่าคงที่  $Tauc$  ที่ได้จากการคำนวณ)

จาก สมการที่ (5) 
$$\varepsilon_i(E) = \frac{B(E - E_g)^2}{E^2}$$

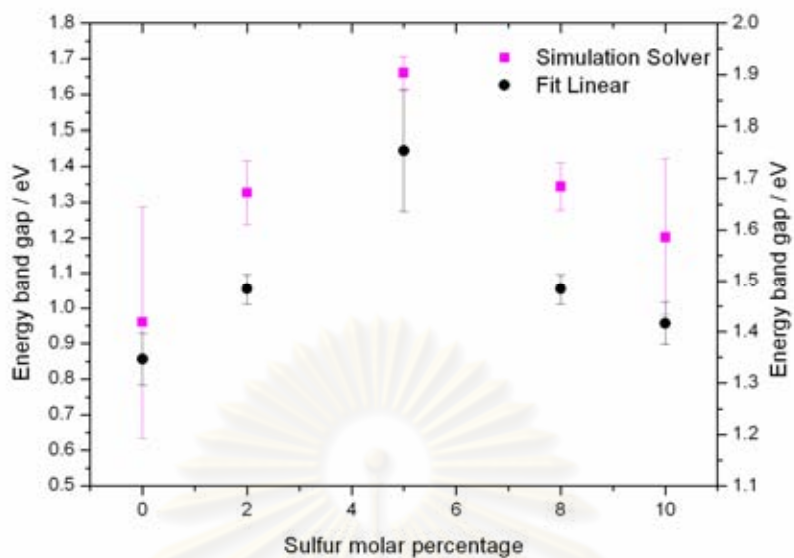
จะได้ว่า 
$$\text{Simulation} = \frac{B(E - E_g)^2}{E^2}$$

$$\text{Raw data} = (2nk)$$

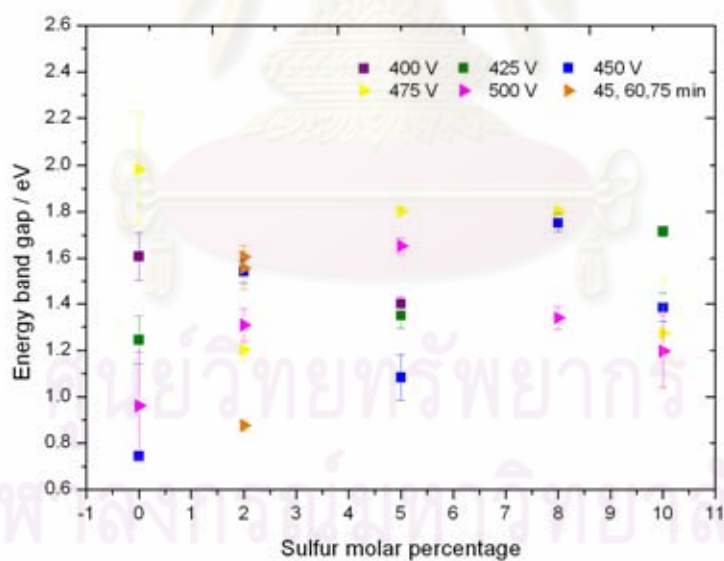
$$\text{Difference} = |(2nk) - \text{Simulation}|$$

$$R^2 = 1 - \frac{[\sum_i (2nk) - \text{Avg} \cdot \sum_i (2nk)]^2}{[(\sum_i 2nk) - \text{Simulation}]^2}$$

และนำข้อมูลจากทั้ง 2 วิธีมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ ค.1 และ ค.2



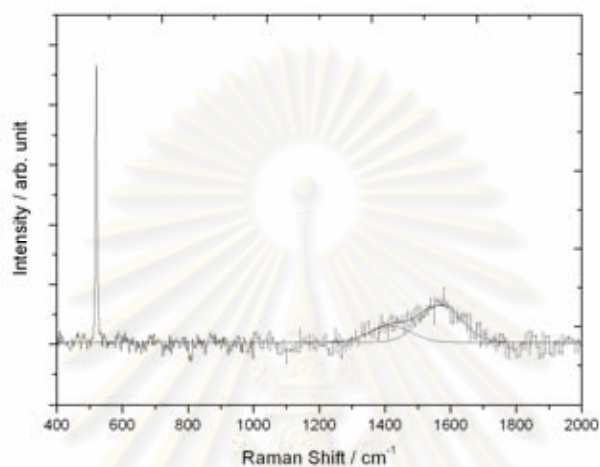
รูปที่ ค.1 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10% โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการ Simulation และ Fit linear



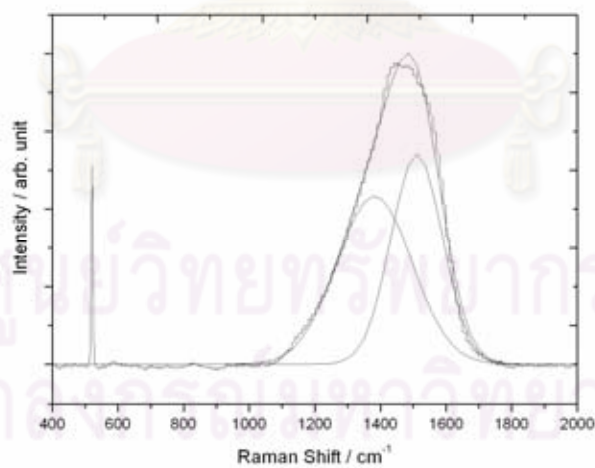
รูปที่ ค.2 แถบพลังงานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อซัลเฟอร์ 0-10% ความต่างศักย์ 400-500V และ ที่เวลา 30-75 min

### ภาคผนวก

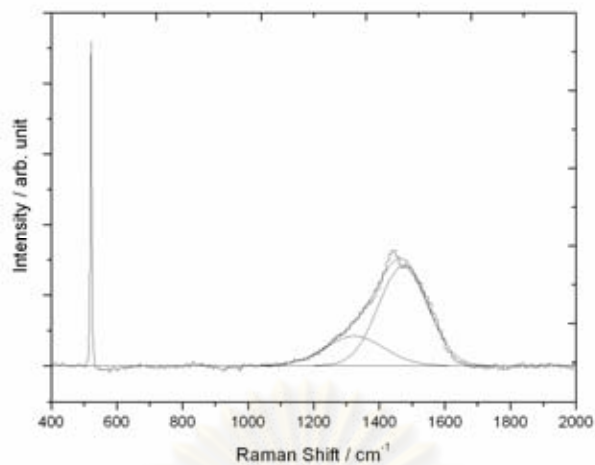
ตัวอย่างสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อซิลเฟออร์ 0-10% โดยใช้ Fit Gaussian (2peak) ภายใต้เงื่อนไขความดัน  $8 \times 10^{-2}$  torr บนตัวรองรับเวเฟอร์ ซิลิคอน ชนิดพี



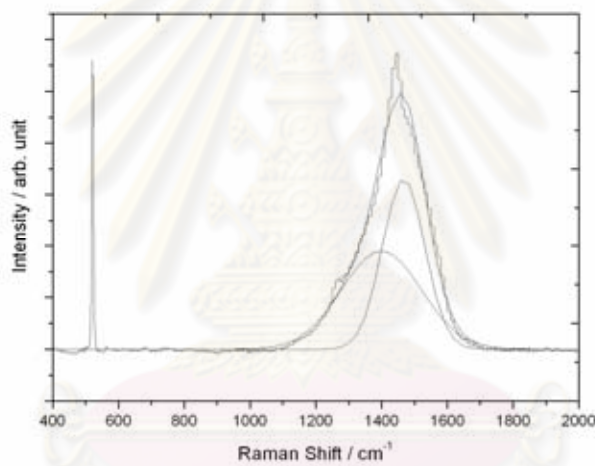
รูปที่ ง.1 ฟิล์ม DLC



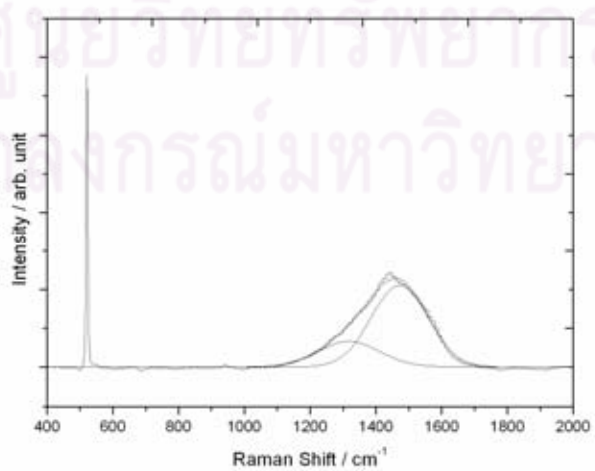
รูปที่ ง.2 ฟิล์ม DLC เจือซิลเฟออร์ 2%



รูปที่ ง.3 फिल्म DLC เจือซัลเฟอร์ 5%



รูปที่ ง.4 फिल्म DLC เจือซัลเฟอร์ 8%



รูปที่ ง.5 फिल्म DLC เจือซัลเฟอร์ 10%

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรัญญา แซ่เฮ็ง เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2528 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายในปีการศึกษา 2547 จากโรงเรียนสภาราชนี จังหวัดตรัง จากนั้นเข้าศึกษาในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ และสำเร็จปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ในปีการศึกษา 2550 และได้ทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553

การประชุมวิชาการที่เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย

1. นำเสนอผลงานเรื่อง Synthesis of diamond like carbon films using dc magnetron sputtering method ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35 วันที่ 15-17 ตุลาคม 2552 ณ โรงแรมเดอะ ไทด์ รีสอร์ท (หาดบางแสน) จังหวัดชลบุรี
2. นำเสนอผลงานเรื่อง Effect of Sulfur doped Diamond-like Carbon Films on the electrical Properties by DC Magnetron Sputtering ในการประชุมวิชาการ 2<sup>nd</sup> International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2010) วันที่ 5-10 มีนาคม 2553 ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เมืองนาโกย่า ประเทศญี่ปุ่น
3. นำเสนอผลงานเรื่อง Deposition and characterization of diamond like carbon film using DC magnetron sputtering method ในการประชุมวิชาการ SPC 2010 วันที่ 25-27 มีนาคม 2553 ณ โรงแรมริเวอร์แคว วิลเลจ จังหวัดกาญจนบุรี
4. นำเสนอผลงานเรื่อง Sulfur doped diamond-like carbon nanofilms deposited by sputtering method ในการประชุมวิชาการ และนิทรรศการนานาชาติ NanoThailand 2010 วันที่ 18-20 พฤศจิกายน 2553 ณ อาคารศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จังหวัดปทุมธานี